

**IMPLEMENTACIÓN DEL MATERIAL TRATADO POR LA EMPRESA
GEOAMBIENTAL S.A.S EN LA CAPA DE BASE GRANULAR DE UN
PAVIMENTO FLEXIBLE**

PRESENTADO POR

DIANA MARÍA OLAYA ORTIZ

CÓDIGO: 506616

SERGIO ANDRÉS MORENO SALAZAR

CÓDIGO: 506469



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D.C.
2020**

**IMPLEMENTACIÓN DEL MATERIAL TRATADO POR LA EMPRESA
GEOAMBIENTAL S.A.S EN LA CAPA DE BASE GRANULAR DE UN
PAVIMENTO FLEXIBLE**

PRESENTADO POR:

DIANA MARÍA OLAYA ORTIZ

CÓDIGO: 506616

SERGIO ANDRÉS MORENO SALAZAR

CÓDIGO: 506469

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

DIRECTOR:

LAURA MARÍA ESPINOSA HERMIDA

COASESOR:

JUAN RAMON VARGAS MADRID



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D.C.
2020**



Atribución-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-SA 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/co/>

Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. ANTEDECENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	15
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
4. OBJETIVOS.....	20
4.1. Objetivo general	20
4.2. Objetivos específicos.....	20
5. ALCANCES Y LIMITACIONES	21
5.1. Alcances	21
5.2. Limitaciones	21
6. MARCO DE REFERENCIA	22
6.1. Marco Teórico, Conceptual y Legal.....	22
6.1.1. ¿Qué es un pavimento?	22
6.1.2. Clases de pavimentos	23
6.1.2.1. Pavimentos flexibles	23
6.1.2.2. Pavimentos rígidos	25
6.1.2.3. Pavimentos articulados o en adoquín	27
6.1.2.4. Pavimentos semirrígidos	29
6.1.3. Pavimentos Flexibles	30
6.1.3.1. Funciones correspondientes a cada una de las capas que constituyen un pavimento flexible	31
6.1.3.1.1. Capa asfáltica	31
6.1.3.1.2. Capa base.....	31

6.1.3.1.3. Capa subbase	32
6.1.3.2. Métodos para el diseño de pavimentos flexibles:	32
6.1.3.2.1. Método Empírico	32
6.1.3.2.2. Método de diseño analíticos, mecanicistas o racionales	34
6.1.3.3. Materiales que lo constituyen	34
6.1.3.3.1. Subrasante.....	35
6.1.3.3.2. Sub - Base Granular	36
6.1.3.3.3. Base Granular	36
6.1.3.3.4. Concretos Asfálticos	36
6.1.4. Propiedades de los Granulares	37
6.1.4.1. Composición.....	37
6.1.4.2. Durabilidad	37
6.1.4.3. Dureza	37
6.1.4.4. Geometría de las partículas	38
6.1.4.5. Limpieza.....	38
6.1.4.6. Resistencia.....	39
6.1.5. Asfaltos.....	39
6.1.5.1. Propiedades de los Asfaltos	40
6.1.5.1.1. Viscosidad (60 - 135).....	40
6.1.5.1.2. Ductilidad	41
6.1.5.1.3. Consistencia.....	42
6.1.5.1.4. Pureza	43
6.1.5.1.5. Seguridad.....	44
6.1.6. Agregados Pétreos	44

6.1.7. Base Granular	45
6.1.7.1. Tipos de bases granulares	45
6.1.7.2. Base tipo C	47
6.1.9. Estabilización	50
6.1.10. Bases Estabilizadas	51
6.1.10.1. Ventajas de la estabilización de bases	51
6.1.10.2. Tipos de estabilización	52
6.1.10.3. Importancia de los agregados para el proceso de estabilización	53
6.1.10.1. Materiales empleados para la estabilización de bases	53
6.1.10.1.1. Cemento	53
6.1.10.1.1.1. Dosificación	56
6.1.10.1.1.2. Normas colombianas para la estabilización de bases con cemento	58
6.1.10.1.2. Cal	60
6.1.10.1.2.1. ¿Qué es la cal?	61
6.1.10.1.2.2. Estabilización de suelos con cal	62
6.1.10.1.2.3. Subrasante o sub bases estabilizadas:	63
6.1.10.1.2.4. Bases estabilizadas	63
6.1.10.1.2.5. Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de cal.	64
6.1.10.1.3. Emulsión Asfáltica	65
6.1.10.1.3.1. Suelos estabilizados con emulsión asfáltica	66
6.1.10.1.3.2. Propiedades de los agregados:	67
6.2. Normatividad aplicada	67

7. METODOLOGÍA	68
7.1. Tipo de investigación	68
7.2. Fuentes de información	68
7.2.1. Fuentes primarias	68
7.2.2. Fuentes secundarias	68
8. DISEÑO METODOLÓGICO.....	69
8.1. Etapa 1: Recopilación de la información.....	71
8.2. Etapa 2: Recopilación de antecedentes	72
8.3. Etapa 3: Análisis de la información	72
9. DESCRIPCIÓN VISUAL DEL MATERIAL TRATADO POR GEOAMBIENTAL S.A.S	73
10. ENSAYOS DE LABORATORIO INV E-13 DESARROLLADOS	75
10.1. Ensayo de Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos INV E – 732 - 13.	76
10.1.1. Preparación de la muestra.....	76
10.1.2. Metodología del ensayo	76
10.1.3. Procedimiento detallado	76
10.1.4. Resultados obtenidos	81
10.1.5. Cálculos.....	81
10.1.6. Análisis	82
10.2. Ensayo de punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta Cleveland INV E – 709 – 13.	83
10.2.1. Preparación de la muestra.....	83
10.2.2. Metodología del ensayo	84
10.2.3. Procedimiento detallado	84

10.2.4. Resultados obtenidos	88
10.2.5. Cálculos	88
10.2.6. Análisis	89
10.3. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino INV E – 222 – 13.	90
10.3.1. Preparación de la muestra.....	90
10.3.2. Metodología del ensayo	90
10.3.3. Procedimiento detallado	90
10.3.4. Resultados obtenidos	94
11. ANÁLISIS GENERAL.....	97
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
BIBLIOGRAFÍA	105

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Uso típico de las diferentes clases de base granular</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 2. Niveles de tránsito.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3. Correspondencia entre clases de capas granulares, el tipo de pavimento y las categorías de tránsito</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 4. Requisitos de los agregados para bases granulares INVIAS</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 5. Requisitos de los agregados para bases granulares IDU.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 6. Especificaciones de los materiales granulares para una BG-C</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 7. Clasificación AASHTO.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 8. Porcentajes de cemento iniciales tomando en cuenta el handbook de suelo-cemento de la AASHTO</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 9. Uso de capas de materiales granulares estabilizados con cemento</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 10. Densidad máxima de referencia para la construcción de materiales capas granulares estabilizadas con cemento.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 11. Resultados obtenidos del ensayo de Extracción INV E - 732 - 13</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 12. Resultados obtenidos en el ensayo de punto de inflamación y combustión INV E - 709 - 13.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 13. Resultados obtenidos en el ensayo de densidad de la muestra INV E - 222 - 13</i>	<i>94</i>

LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Perfil típico de una estructura de pavimento flexible.</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 2. Perfil típico de una estructura de pavimento rígido con junta con pasadores.</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 3. Fenómeno de bombeo que se presenta en los Pavimentos Rígidos.....</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 4. Perfil típico de una estructura de pavimento articulado.</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 5. Vista en planta típica de estructura de pavimento articulado... 28</i>	
<i>Ilustración 6. Perfil típico de una estructura de pavimento semirrígida.</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 7. Medida de la Ductilidad.</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 8. Diagrama propiedades de los materiales para carreteras y su respectivo ensayo.....</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 9. Especificaciones del IDU para capas granulares de base y subbase.</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 10. Etapas de la metodología</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 11. Material tratado por la empresa Geoambiental S.A.S</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 12. Estado material tratado por Geoambiental S.A.S y extraído de los campos de infiltración.....</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 13. Trituración de la fracción del material son similitud a una roca</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 14. Estado final del material triturado.....</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 15. Vertimiento del material en el recipiente de la maquina centrífuga</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 16. Proceso de ensamble de los materiales necesarios para el ensayo de extracción por medio de la máquina centrífuga.</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 17. Adición del reactivo (gasolina) en la maquina centrífuga.....</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 18. Líquido que sale de la máquina centrífuga (color negro).....</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 19. Líquido de fluye a través de la maquina (transparente).....</i>	<i>78</i>

<i>Ilustración 20. Proceso de remoción del papel filtro y material ensayado.....</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 21. Estado final del papel filtro empleado en el ensayo</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 22. Estado final de la muestra del material tratado por Geoambiental empleada en el ensayo.....</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 23. Papel filtro utilizado en el ensayo.....</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 24. Remoción del material contenido en el recipiente de la máquina de centrifugación</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 25. Lavado y secado del material ensayado.</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 26. Peso del papel filtro empleado en el ensayo</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 27. Diagrama fases del ensayo de extracción</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 28. Calentamiento del material tratado por Geoambiental, el cual no se derritió</i>	<i>83</i>
<i>Ilustración 29. Material seleccionado para llenar la copa Cleveland</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 30. Llenado de la copa Cleveland con el material de estudio.....</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 31. Posicionamiento del termómetro.....</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 32. Aplicación de calor a la muestra y encendido de la llama</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 33. Proceso de barrido de la llama.</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 34. Destello en la superficie de la muestra.....</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 35. Presencia de llama en la superficie del material</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 36. Saturación del material tratado por Geoambiental S.A.S.</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 37. Retiro, extensión y secado del material para llevarlo a condiciones de saturado y superficialmente seco (SSS)</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 38. Llenado del molde cónico con el material SSS.....</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 39. Apisonamiento del material en el molde cónico</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 40. Retiro del molde cónico</i>	<i>92</i>
<i>Ilustración 41. Picnómetro.....</i>	<i>92</i>
<i>Ilustración 42. Picnómetro con agua + material</i>	<i>92</i>
<i>Ilustración 43. Máquina de agitación para eliminar las burbujas de agua presentes en la muestra del picnómetro</i>	<i>93</i>

<i>Ilustración 44. Peso picnómetro con agua + material después del baño maría</i>	
.....	93
<i>Ilustración 45. Material ensayado seco al horno</i>	93
<i>Ilustración 46. Diagrama de fases del ensayo de densidad</i>	96

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la infraestructura vial de un país, es de gran importancia para el crecimiento económico de este.¹ Esto se debe a que, el acceso a carreteras que se encuentran en condiciones adecuadas de servicio, facilita el desplazamiento de la población hacia diferentes territorios, así como el transporte de productos desarrollados en diversas zonas, generando un incremento económico y social.¹ Además, la realización de este tipo de infraestructuras, benefician a la comunidad, mediante la producción de empleo, el acceso a servicios médicos básicos, servicios de educación, entre otros.²

En Colombia la mayoría de los habitantes prefieren moverse por tierra, además, es un país que se encuentra en proceso de desarrollo de infraestructura, lo cual exige avances tecnológicos e innovadores, que contribuyan al crecimiento y la competitividad de los diferentes departamentos del país en los sectores económico, territorial, social y cultural, con el fin de reducir los índices de pobreza que se presentan al interior de este y mejorando la calidad de vida de sus habitantes.²

El material a utilizar en esta investigación tiene como origen el petróleo crudo, el cual, por causas naturales o acción humana se derrama en las fuentes hídricas, causando graves problemas de contaminación y alteración del hábitat de diferentes especies de animales y por consiguiente afectando la calidad de vida de los pobladores que habitan el sector donde se produce este derrame; este material es recolectado y llevado a unos campos de infiltración donde es tratado por la empresa Geoambiental S.A.S, para mitigar los efectos ambientales que este genera.^{3,4}

-
1. Pérez V, G. J. A FORTRAN-IV Version of the sum-of-exponential least squares code EXPOSUM. *Libr. Danish At. Energy Comm.* 1279 1–57 (2005).
 2. Gonzalez, A. M. & Alba, C. A. Infraestructura vial en Colombia: un análisis económico como aporte al desarrollo de las regiones 1994-2004. 1–66 (2006).
 3. Serrano Guzmán, M. F., Torrado Gómez, L. M. & Pérez Ruiz, D. D. Impact of Oil Spills on the Mechanical Properties of Sandy Soils. *Rev. Científica Gen. José María Córdova* 11, 233–244 (2013).
 4. Torres, R. G. Contaminación por petróleo. (1983).

Esta investigación considera como objetivo principal, darle el mejor uso a este material en el diseño de la estructura de un pavimento flexible, principalmente en el diseño de la capa de base, por lo cual es necesario realizar un análisis de las condiciones y parámetros en la construcción de una estructura de pavimento flexible, así como la composición y funcionamiento de cada una de las capas que componen dicha estructura, y a su vez las diferentes normas Colombianas que nos permiten caracterizar los diferentes materiales de construcción, como la del Instituto Nacional de Vías INVIAS-13 (basada en la norma Americana AASHTO) o la del Instituto de Desarrollo Urbano IDU-11.

2. ANTEDECENTES Y JUSTIFICACIÓN

Los derrames de petróleo genera consecuencias negativas en las zonas donde estos ocurren como, por ejemplo: la contaminación de fuentes hídricas como ríos, lagos, lagunas, entre otros; además, genera contaminación del suelo debido a que los componentes de estos productos afectan de manera negativa las propiedades de este, lo que a su vez genera alteraciones en el medio ambiente.⁵

Los derrames de petróleo son causados, en ocasiones, por la acción humana, como por ejemplo, las organizaciones al margen de la ley, como es el caso de los grupos guerrilleros, los cuales interfieren y alteran los oleoductos empleados para el transporte de este material, ocasionando así, los derrames de crudo,⁶ y como consecuencia de esto, no solo se observa en los daños que se presentan en el medio ambiente, sino que a su vez, las afectaciones a los pobladores de las zonas donde se produce este derrame, debido a que se estaría contaminando los recursos naturales con los que viven diariamente, como lo son la pesca y los cultivos.⁷

Debido a que este material derramado contiene presencia de residuos indeseables, los cuales, provocan que el proceso de refinamiento sea inviable ya que produce sobre costos, genera que las empresas petroleras desechen el crudo derramado y contraten empresas como Geoambiental, para que se responsabilicen de su adecuada disposición, en vista de que este ya no es útil en los procesos industriales.⁸

-
5. Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B. & Mauricio-Gutiérrez, A. Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México. *Agríc. Soc. y Desarro.* 11, 539 (2014).
 6. ELCOLOMBIANO.COM. DERRAMES DE PETRÓLEO. (2019). Available at: <https://www.elcolombiano.com/cronologia/noticias/meta/derrames-de-petroleo>.
 7. Celis Hidalgo, J. Efectos De Los Derrames De Petroleo Sobre Los Habitats Marinos. *Cienc. Ahora* 24, 22–30 (2009).
 8. Fong, I. A. & Ruiz, A. T. De. EL PETRÓLEO Y SU PROCESO DE REFINACIÓN. *Univ. Tecnológica Panamá* 8,9/47

El material a emplear en esta investigación, proveniente de los procesos de Geoambiental en el tratamiento de los derrames de crudo y como consecuencia a la gran proporción de contaminantes que presenta, no puede ser empleado en procesos industriales como, por ejemplo, la fabricación de cosméticos, caucho, fuente de energía (gasolina) para los sistemas de movilidad que utilizamos actualmente (aviones, barcos, automóviles, entre otros). Dado a que este material es llevado para almacenaje donde sigue ocasionando problemas de contaminación del medio ambiente, es necesario desarrollar mecanismos para emplear este producto, ya que en la actualidad no se han realizado estudios de reutilización e implementación de este; por lo cual, este trabajo investigativo se enfoca en darle un uso a este material y en especial para la construcción de vías que conecten las diferentes regiones de un país, ya que estas son fundamentales para el desarrollo socioeconómico, tanto de las regiones como del país en general. Es por ello, que este proyecto se basa en la investigación de las propiedades que presenta el material tratado por Geoambiental, para ser empleado como material estabilizante de la capa de base granular de un pavimento flexible, considerando una base tipo C, la cual, de acuerdo con las normas colombianas, está diseñada para vías con niveles bajos de tránsito.

En la actualidad se busca el mejoramiento de los materiales empleados para el diseño y construcción de los pavimentos y que, a su vez, estos materiales sean amigables con el medio ambiente; en la industria existen diferentes materiales disponibles para la estabilización de una base, entre estos materiales se tiene el cemento, la cal y el bitumen, los cuales se emplearán como referencias para el desarrollo de la investigación, donde se busca utilizar el material tratado por Geoambiental S.A.S como material

estabilizante del material que conforma una base granular clasifica por las normas Colombianas como tipo C.

El uso de materiales alternos para la estabilización de suelos granulares empleados como base en un pavimento es de gran importancia para el desarrollo de esta investigación, ya que a lo largo de la misma se hablara de bases granulares estabilizadas implementando un material el cual nunca se ha utilizado en la industria de la construcción o en cualquier otro trabajo, este material proviene de los procesos realizados por la empresa Geoambiental S.A.S. en los tratamientos y control de contaminación del material recolectado en los derrames de crudo en los ecosistemas.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los procesos de extracción, transporte y almacenamiento de petróleo, presentan grandes inconvenientes debido a los procesos mismos, ya que en estos eventos, más que todo en el transporte están expuestos a derrames que pueden aparecer por diferentes factores: 1. Factores meramente técnicos: debilidad de los contenedores de los tubos o de los carrotanques, 2. Factores ambientales: como inclemencias climáticas, terremotos, y diferentes fenómenos geológicos, 3. Ataques vandálicos de grupos indulgentes, entre otros factores.⁶ La contaminación causada por los derrames de petróleo es un tema de gran importancia hoy en día, ya que este material no es empleado en ningún proceso relacionado con el uso del petróleo o cualquier otro proceso industrial, debido a que, hasta el momento no se han realizado estudios para la reutilización del mismo o para darle un mejor destino, lo que provoca que sean desechados y llevados a un campo de infiltración en donde es tratado por empresas como Geoambiental S.A.S con el fin de mitigar los efectos adversos que produce al medio.

En nuestro país los derrames que se pueden presentar en el territorio colombiano, son ocasionados más por acción humano que por fallas técnicas en los procesos que conlleva el tratamiento de petróleo. Estas fallas se atribuyen principalmente a los grupos al margen de la ley, los cuales, requieren de este material para la elaboración de sustancias psicoactivas (coca), con el fin de alguna remuneración económica en su lucha contra el Estado. Estos actos vandálicos ocasionan alteraciones en el medio ambiente, destruyendo ecosistemas enteros, perjudicando la vida presente en estas zonas y por ende la economía del país, ya que los

6. ELCOLOMBIANO.COM. DERRAMES DE PETRÓLEO. (2019). Available at: <https://www.elcolombiano.com/cronologia/noticias/meta/derrames-de-petroleo>.

encargados se solucionar estos problemas son los entes gubernamentales de cada departamento.⁷

Dentro de lo expuesto, la presente investigación tiene como finalidad determinar si el material tratado por Geoambiental S.A.S, sirve como un material de estabilización de una base granular, aplicando este material inicialmente en aquellas bases granulares que presentan niveles de tránsito bajos, como es el caso de la base denominada como “tipo C”⁹, ya que este tipo de bases requieren de menor resistencia como consecuencia a que las cargas impuestas son menores en comparación a las capas empleadas en vías de mayor calidad y con mayor tránsito; utilizando como referencia las aplicaciones existentes con materiales estabilizadores como lo es el cemento, la cal y el bitumen.

7. Celis Hidalgo, J. Efectos De Los Derrames De Petroleo Sobre Los Habitats Marinos. *Cienc. Ahora* **24**, 22–30 (2009).
9. INVIAS. Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. 1–8 (2013).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Identificar los materiales comúnmente empleados para los procesos de estabilización de bases con el fin de plantear un posible uso al material tratado por Geoambiental para mejorar las propiedades de una base granular.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar el porcentaje de bitumen en una muestra representativa del material tratado por Geoambiental S.A.S, mediante el ensayo de extracción (INV E - 732).
- Determinar los parámetros de seguridad que presenta el material de estudio, mediante los puntos de inflamación y combustión (INV E - 709).
- Estimar, tanto teórico como visualmente las posibles características que presenta el material tratado por Geoambiental S.A.S, haciendo uso de los ensayos realizados.
- Establecer teóricamente los posibles usos que puede tener el material tratado por Geoambiental S.A.S en la estructura de un pavimento flexible.

5. ALCANCES Y LIMITACIONES

5.1. Alcances

Este proyecto de investigación abordará el estudio y análisis de los parámetros de los materiales que constituyen una capa de base en un pavimento flexible, así como los diferentes materiales empleados para la estabilización de bases granulares, con el fin de evaluar diferentes alternativas de uso para el material proveniente de la empresa Geoambiental S.A.S. en la estructura de un pavimento flexible y de esta forma, plantear el mejor uso posible para emplear este material.

5.2. Limitaciones

El desarrollo del proyecto se planteaba realizar en el primer semestre del año en curso (2020-I) y dada la problemática sanitaria que se ha presentado tanto a nivel Nacional como a nivel Mundial y a las exigencias establecidas por la Universidad Católica de Colombia para el cumplimiento de las fechas establecidas para la entrega del trabajo de grado, esta investigación se limita al planteamiento de los posibles usos que pueda tener el material de estudio en la estructura de un pavimento flexible empleando los datos recolectados en los ensayos de laboratorio que se lograron desarrollar antes de se genera esta problemática en nuestro territorio Nacional, ya que no se cuenta con los datos necesarios para llevar a cabo la totalidad de la caracterización de dicho material como consecuencia de la inaccesibilidad a los espacios requeridos para el desarrollo de las prácticas de laboratorio restantes, debido a las medidas tomadas por el Gobierno Nacional

En cuanto al material tratado por Geoambiental, entre las limitaciones que se puede considerar, tenemos la funcionalidad de los ensayos establecidos en la norma INVIAS para la caracterización del mismo material, ya que estos están diseñados para materiales específicos y este al ser un nuevo material, es posible que requiera de la creación de nuevos ensayos para realizar la correcta y adecuada caracterización.

6. MARCO DE REFERENCIA

En este ítem se plantean los conceptos, características y normatividad más relevantes relacionados a la temática de pavimentos, los cuales, serán empleados para el desarrollo del proyecto.

6.1. Marco Teórico, Conceptual y Legal

6.1.1. ¿Qué es un pavimento?

El pavimento es una estructura vial que se compone de diversas capas sobrepuestas horizontalmente, las cuales se constituyen de materiales seleccionados; contruidos técnicamente sobre una subrasante y son capaces de permitir la circulación vehicular, donde dicha estructura, se encarga de soportar las cargas provenientes por condiciones ambientales y del tránsito transmitiendo estas cargas a las capas inferiores de una forma disipada y distribuida, con el fin de experimentar esfuerzos y deformaciones tolerables que puedan afectar considerablemente las características de la estructura del pavimento; además, esta estructura debe proveer una superficie adecuada que permita las condiciones de circulación vehicular, con el fin de ofrecer comodidad, seguridad y economía en el viaje al automotor que transite por una vía.^{10,11,12,13}

Existen diferentes normas, como el AASHTO, IDU o el INVIAS,¹⁴ donde se puede consultar las características y requerimientos de construcción que deben cumplir los pavimentos dependiendo de su lugar de construcción; en nuestro país, son de uso común las del INVIAS o el IDU, siendo su marco de referencia las de la AASHTO.^{9,15}

-
9. INVIAS. Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. 1–8 (2013).
 10. Huang, Y. H. Pavement design and analysis. **Second Edi**, 785 (2004).
 11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).
 12. Arenas Lozano, H. L. 1 . CONCEPTOS FUNDAMENTALES. 1–41 (1999).
 13. Sanchez Sabogal, F. *PAVIMENTO*. (1984).
 14. Yoder, E. J. & Witczak, M. W. *Principles of Pavement Design*. (A Wiley-Interscience publication, 1991).
 15. Instituto de Desarrollo Urbano. Capas Granulares De Base Y Subbase. 102 (2005).

Los pavimentos son contruidos para un periodo determinado de diseño, sin que se presenten fallas estructurales en estos, que de acuerdo con el señor Hugo Arenas, hacen referencia “al colapso de la estructura o de alguno de sus componente, de tal forma que es imposible absorber los esfuerzos inducidos”¹¹ provenientes de las cargas generadas por la circulación de vehículos sobre la estructura del pavimento, lo que ocasiona que la capacidad o resistencia del pavimento se vea reducida y por ende, la estructura no cumpla con sus funciones primordiales, desencadenando así una serie de problemas, como la inseguridad de los usuarios y el aumento de los costos de operación y mantenimiento.^{16,17}

6.1.2. Clases de pavimentos¹⁴

6.1.2.1. Pavimentos flexibles

Este tipo de pavimentos, de acuerdo con el ingeniero Hugo Rondón, son “estructuras conformadas por una capa asfáltica”,¹¹ esta capa asfáltica o de rodadura se encuentra constituida por la mezcla de agregados pétreos y de un material asfáltico, la cual se encuentra apoyada sobre otras capas de menor rigidez; estas capas se denominan como base, subbase y subrasante; la composición de la base y subbase corresponde principalmente a material granular seleccionado y debidamente compactado; la capa de subrasante hace referencia al terreno natural, el cual, en algunos casos es mejorado para la adecuación y construcción de la estructura del pavimento.^{11,13}

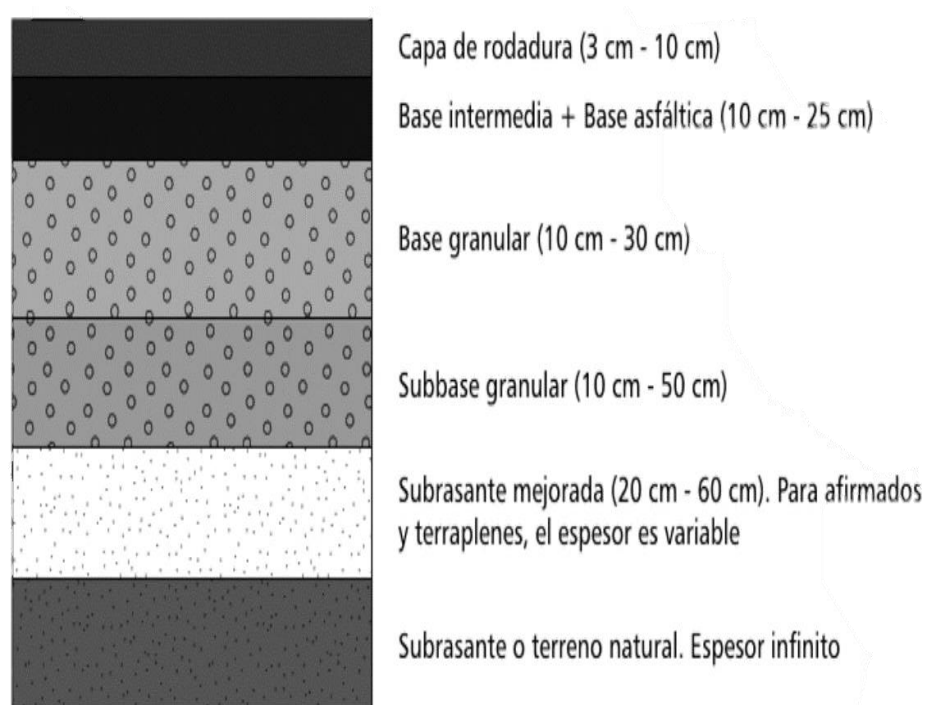
Los esfuerzos generados por la circulación vehicular sobre el pavimento, se disipan a medida que son transmitidos a las capas

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).
13. Sanchez Sabogal, F. *PAVIMENTO*. (1984).
14. Yoder, E. J. & Witczak, M. W. *Principles of Pavement Design*. (A Wiley-Interscience publication, 1991).
16. INTERBITUMEN. *P a v i m e n t o s*. (2018).
17. Hveem, F. N. Pavement Deflections and Fatigue Failures. 43–87 (1948).

inferiores de la estructura, con el fin de que, al llegar estos esfuerzos a la capa correspondiente a la subrasante, esta sea capaz de resistir el esfuerzo aplicado sin que se generen deformaciones que puedan afectar los sistemas estructural y funcional del pavimento.¹¹

La siguiente ilustración (Ilustración 1), presenta el perfil típico de una estructura de pavimento flexible, donde se puede observar las diferentes capas mencionadas anteriormente.

Ilustración 1. Perfil típico de una estructura de pavimento flexible.



Fuente: Rondón, Q. H. A. (2015). Pavimentos: Materiales, construcción y diseño.¹¹

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).

6.1.2.2. Pavimentos rígidos

Este tipo de pavimento hace referencia a aquellos cuya estructura la componen una capa o losa de concreto hidráulico con espesor entre 18 y 30 cm, la cual, se encuentra apoyada sobre una capa intermedia de material granular seleccionado, denominado subbase y por último encontramos la capa natural o subrasante.¹¹

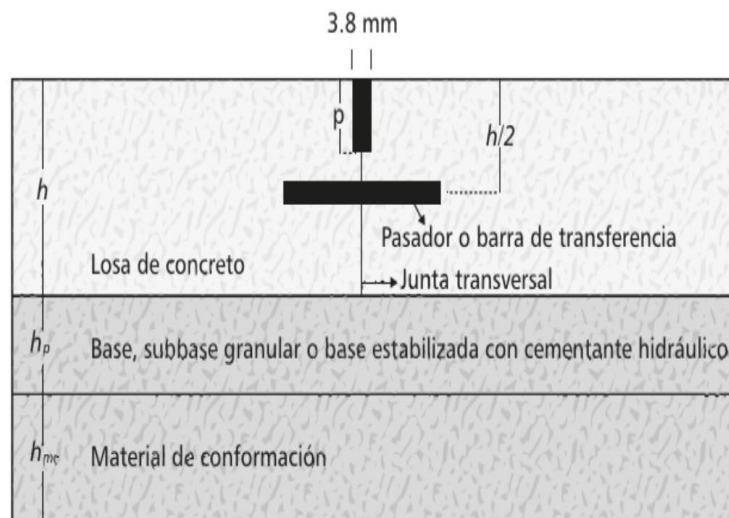
La función de la losa de concreto consiste en absorber la mayor parte de los esfuerzos producidos por las cargas de tránsito y transmitirlos hacia la subrasante, los cuales son transmitidos en magnitudes mucho menores que los pavimentos flexibles y con una distribución más amplia; además esta losa debe proporcionar una superficie uniforme, estable y de adecuada textura, donde se garantice la seguridad y comodidad de la estructura, así como la impermeabilización de las capas de la subyacen.¹¹

La capa de subbase brinda apoyo a las losas de concreto y además debe prevenir que se presente el fenómeno denominado bombeo al interior de la estructura del pavimento; este acontecimiento consiste en la salida del suelo fino con agua proveniente de la subrasante a través de las juntas que se forman en las losas del pavimento, debido a la circulación vehicular. La repetición de este evento origina la presencia de cavidades bajo las losas de concreto en aproximación a las juntas, lo que ocasiona que en esta sección las losas trabajan en voladizo, siendo propensas a fallas debido a que quedan sometidas a esfuerzos no previstos en el diseño.¹³

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).
13. Sanchez Sabogal, F. *PAVIMENTO*. (1984).

En la siguiente ilustración (Ilustración 2) se muestra un perfil correspondiente a una estructura de pavimento rígido, donde se puede observar que la componen tres capas, que corresponden a la losa de concreto, que como se mencionaba anteriormente, su espesor oscila entre 18 y 30 cm, luego tenemos la subbase o base granular con un espesor entre 10 y 25 cm y por último observamos la capa natural. Además, en esta figura se observa la presencia de un pasado, cuya función es evitar que se produzca el efecto de bombeo (Véase Ilustración 3), al no permitir la filtración de agua y por ende la salida del material fino, trabajando como un sellante.¹¹

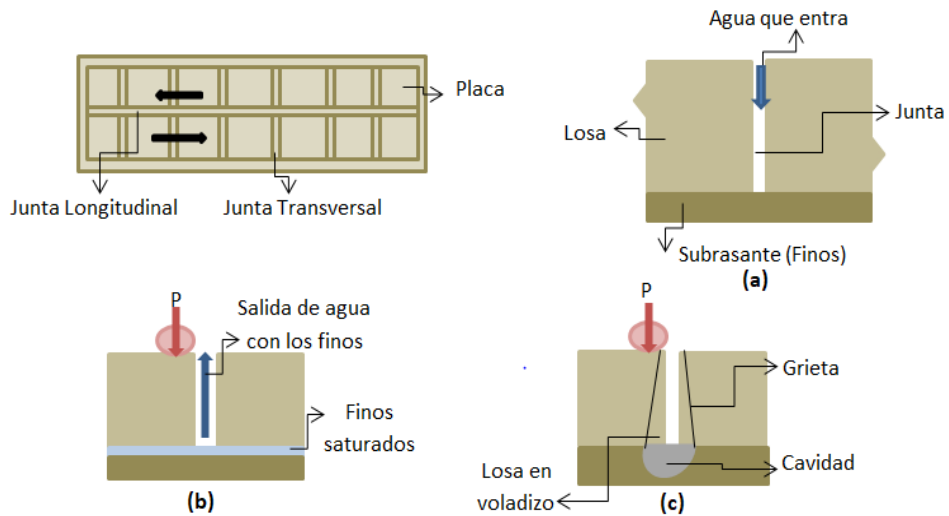
Ilustración 2. Perfil típico de una estructura de pavimento rígido con junta con pasadores.



Fuente: Rondón, Q. H. A. (2015). Pavimentos: Materiales, construcción y diseño.¹¹

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).

Ilustración 3. Fenómeno de bombeo que se presenta en los Pavimentos Rígidos



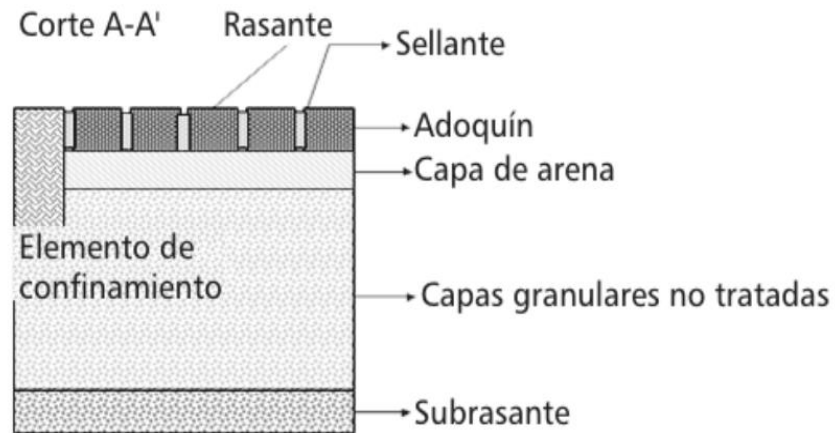
Fuente: Autores.

6.1.2.3. Pavimentos articulados o en adoquín

La estructura de este tipo de pavimentos, la cual se observa en las ilustraciones 4 y 5, está compuesta superficialmente por bloques de concreto prefabricado, los cuales se denominan como adoquines, que constan de un espesor y dimensiones uniformes; estos elementos son unidos entre sí gracias a un material sellante. Estos adoquines se encuentran apoyados sobre una capa de arena con espesores entre 3 a 5 cm debidamente compactada; esta capa de arena subyace sobre una capa de base granular o sobre una base tratada con cemento, dependiente de tráfico que se presenta en la zona, ya que la capa de arena también puede estar directamente sobre la subrasante.¹¹

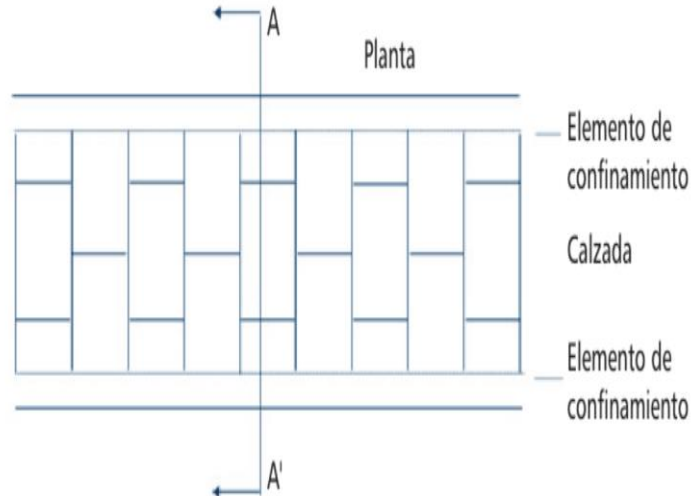
11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).

Ilustración 4. Perfil típico de una estructura de pavimento articulado.



Fuente: Rondón, Q. H. A. (2015). Pavimentos: Materiales, construcción y diseño.¹¹

Ilustración 5. Vista en planta típica de estructura de pavimento articulado.



Fuente: Rondón, Q. H. A. (2015). Pavimentos: Materiales, construcción y diseño.¹¹

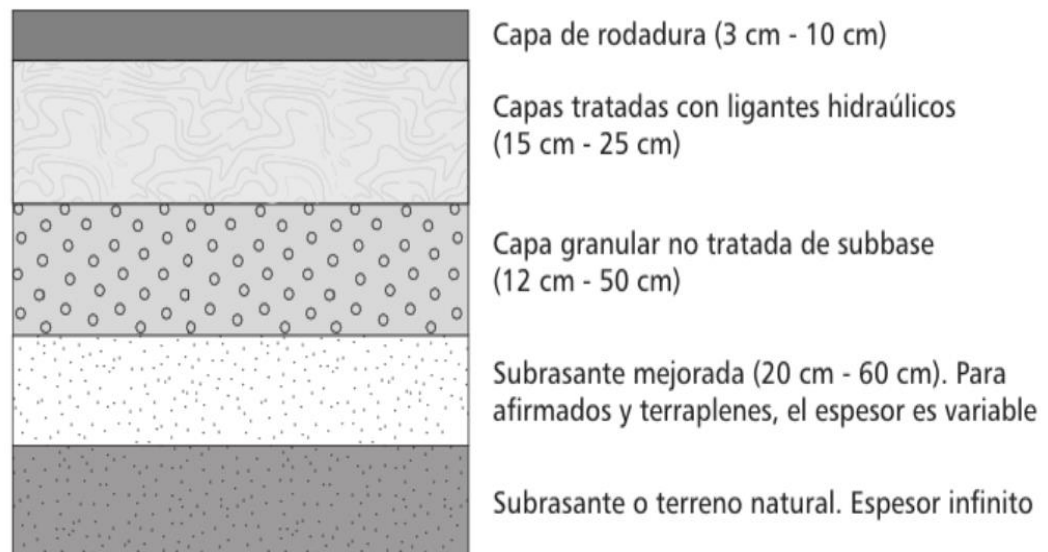
11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).

6.1.2.4. Pavimentos semirrígidos

Estos pavimentos están compuestos básicamente con una estructura similar a la de uno flexible; están conformados por una capa asfáltica que se encuentra apoyada sobre una capa rigidizada artificialmente con un aditivo, como asfalto, emulsión, cemento, cal o químicos, los cuales, tienen la función de estabilizar los suelos mejorando características de compactación y resistencia; esta capa, a su vez es soportada sobre una capa de material granular denominada como subbase y una subrasante.¹¹

En la ilustración 6, se observa un perfil típico de una estructura de pavimento semirrígida y las capas que conforman dicha estructura.

Ilustración 6. Perfil típico de una estructura de pavimento semirrígida.



Fuente: Rondón, Q. H. A. (2015). Pavimentos: Materiales, construcción y diseño.¹¹

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).

6.1.3. Pavimentos Flexibles

Los pavimentos flexibles están compuestos principalmente de materiales bituminosos y granulados, donde las capas asfálticas que componen la estructura de este, no tienen una función estructural, ya que las capas granulares soportan casi que en su totalidad las cargas impuestas por el tránsito. Las capas superiores de la estructura de un pavimento flexible se componen de materiales de resistencia alta en comparación a los materiales empleados en las capas inferiores de la estructura.^{10, 11}

Todos los pavimentos deben ser diseñados para garantizar su resistencia a las cargas impuestas por el tráfico, sin que se presenten grandes deformaciones en la estructura de estos, lo que ocasiona la falla o colapso del mismo; en los pavimentos flexibles, estas deformaciones se presentan en cada capa que componen la estructura de este pavimento.

En la mayoría de los casos, estas deformaciones permanentes se evidencian principalmente en la capa de subrasante, por otro lado, en vías donde la circulación vehicular no es tan alta, son las capas granulares la que absorben casi la totalidad de los esfuerzos inducidos por el tránsito y es en estas capas donde se podría evidenciar deformaciones permanentes de gran magnitud.^{14,17}

Este tipo de pavimentos tiene un periodo de vida o de diseño entre 10 a 15 años, pero requieren de constante mantenimiento para cumplir con su vida útil.

10. Huang, Y. H. Pavement design and analysis. **Second Edi**, 785 (2004).
11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).
14. Yoder, E. J. & Witczak, M. W. *Principles of Pavement Design*. (A Wiley-Interscience publication, 1991).
17. Hveem, F. N. Pavement Deflections and Fatigue Failures. 43–87 (1948).

6.1.3.1. Funciones correspondientes a cada una de las capas que constituyen un pavimento flexible

6.1.3.1.1. Capa asfáltica

Debido a que esta capa es la que está en contacto con los vehículos que circulan sobre la estructura de pavimento, su estructura debe ser diseñada de tal forma que soporte la fatiga y deformaciones inducidas por la circulación vehicular; adicionalmente, debe resistir los efectos provenientes del clima.

Desde un aspecto funcional, esta capa debe permitir una superficie de rodamiento uniforme, estable y de textura apropiada, de tal forma que permita la circulación de los vehículos de manera cómoda y segura durante su periodo de vida útil.

Por otro lado, esta capa debe impedir la penetración del agua de forma directa hacia las capas inferiores de la estructura del pavimento, para que de esta forma restrinja “la pérdida de resistencia al corte que pueden experimentar las capas granulares de base y subbase, así como la subrasante cuando se incrementa el grado de saturación de los materiales que la conforman”.^{11,13}

6.1.3.1.2. Capa base

La función principal de esta capa consiste en recibir los esfuerzos impuestos por el tránsito vehicular a través de la capa de rodadura, absorbiendo así buena parte de estos y transmitiendo dichos esfuerzos disipados a la capa de subbase de tal manera que la magnitud de estos esfuerzos esté en la capacidad de resistencia

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).
13. Sanchez Sabogal, F. *PAVIMENTO*. (1984).

de la subbase y con el fin de que se generen los esfuerzos adecuados en la subrasante. ^{11,13,18}

6.1.3.1.3. Capa subbase

En los pavimentos flexibles, esta capa posee un espesor entre 10 a 50 cm y su principal función es transmitir los esfuerzos adecuados a la subrasante, esta capa también colabora con el drenaje de la estructura y a la facilidad de en su construcción.

La subbase granular en ocasiones puede contrarrestar los cambios volumétricos ocasionados por la subrasante cuando se tiene materiales expansivos.

Además de brindar soporte a la estructura, esta capa reduce el paso de material fino de la subrasante hacia la capa base y sirve como capa de transición entre la subrasante y la base, con el fin de evitar que los materiales finos de la capa subrasante contaminen los granulares de la base, desmejorando así las propiedades de calidad de esta y por consiguiente su resistencia.^{11,13}

6.1.3.2. Métodos para el diseño de pavimentos flexibles:

6.1.3.2.1. Método Empírico

Esta metodología se relaciona con el estudio del comportamiento del pavimento en situ, por medio de observaciones y mediciones en campo, donde se considera los factores que causan desgaste en la estructura del pavimento como lo son, las cargas impuestas por los vehículos que transitan la vía, las condiciones ambientales a la que se expone la estructura, en especial

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).

13. Sanchez Sabogal, F. *PAVIMENTO*. (1984).

18. Morales Cárdenas, P. J., Chávez Arévalo, O. & López Poveda, L. Efectos de la alta compactación de la capa de base en pavimentos flexibles. *Univ. Nac. Ing. Fac. la Tecnol. la Construcción* 1–90 (2009).

temperatura y precipitación, las condiciones del terreno donde se construirá el pavimento y la calidad de los materiales que se emplearán para la ejecución del mismo.¹¹

Las deformaciones de un pavimento flexible corresponden a la suma de la deformación que se genera en cada capa que compone su estructura; sin embargo, los métodos empíricos suponen que la deformación total de un pavimento flexible se produce en su mayoría en la subrasante, debido a que esta capa es la de menor rigidez, además, es la de mayor probabilidad de un alto nivel de contenido de agua, por ende, es la más susceptible a sufrir deformaciones. Este método no considera la función de las capas granulares en cuanto a deformaciones permanentes en las vías con bajo tránsito. ¹¹

Además de la hipótesis expuesta anteriormente con relación a la deformación total en un pavimento flexible, los métodos empíricos no consideran otros aspectos en el diseño del pavimento:

- No permiten la adaptación de la estructura del pavimento a condiciones que sean distintas a las estudiadas, por lo que, si se presenta un cambio en las condiciones climáticas o de tránsito en la zona analizada, perjudica al dimensionamiento del pavimento realizado por este método.
- Este método requiere de gran inversión y se necesita de tiempo para la realización de los ensayos, además, si se requiere la implementación de materiales diferentes a los analizados a lo largo del estudio, tendría inconvenientes de índole económico, debido a que se tendría que analizar el comportamiento de estos nuevos elementos de acuerdo a las condiciones estudiadas.

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).

6.1.3.2.2. Método de diseño analíticos, mecanicistas o racionales

Los métodos analíticos tienen en cuenta los esfuerzos y las deformaciones que se presentan en cada capa que compone la estructura de del pavimento flexibles y a su vez, como influyen estas en su comportamiento. Este método emplea programas computacionales para determinar los esfuerzos y deformaciones que se puedan llegar a generar en cada capa.¹¹

La metodología analítica presenta relaciones con la empírica, como es el caso del criterio de diseño del pavimento, donde esta falla debido a la acumulación de esfuerzos a tracción en las capas inferiores de la estructura como consecuencia a los ciclos de carga y descarga a los que se expone.¹¹

Por otro lado, este método presenta una gran desventaja que consiste en el estudio de los esfuerzos y deformaciones, donde se considera que el “pavimento flexible es un sistema multicapa elástico lineal”,¹¹ el cual se compone de la capa de subrasante, capa granular no tratada y la capa asfáltica; la problemática radica en que el sistema lineal no considera la viscosidad de los materiales asfálticos y la inelasticidad de los granulares. Además, este método supone que los materiales empleados son isotrópicos y homogéneos.

6.1.3.3. Materiales que lo constituyen

Las capas que constituyen la estructura del pavimento deben estar compuestas de materiales adecuados, donde, aquellos materiales con mayor capacidad de carga deben estar ubicados en las capas

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).

superiores, ya que estas capas son las encargadas de recibir el mayor impacto de carga generadas por el tránsito vehicular y por ende, es en estas capas donde se generan los mayores esfuerzos, los cuales decrecen con la profundidad; por otro lado, las cargas superiores también cumplen la función de disipar dichas cargas antes de transmitir las, para así evitar sobre esfuerzos en las capas inferiores.^{19,20}

Los materiales que componen las capas de la estructura del pavimento son fundamentales para las características y comportamiento de este,²⁰ pero, en estos aspectos también influyen los procesos constructivos, como es el caso de la compactación y humedad, “ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes”.¹⁶

6.1.3.3.1. Subrasante

Esta capa corresponde al terreno natural donde se apoya toda la estructura del pavimento. Por otro lado, la capacidad portante de esta capa influye en gran magnitud en el dimensionamiento de las capas que componen la estructura del pavimento. Normalmente, si el terreno natural donde se apoyará la estructura del pavimento no cumple con algún requerimiento, se utilizan capas de relleno de material seleccionado de procedencias naturales o sometidas a modificaciones mínimas, los cuales deben estar debidamente compactados y cumplir con la función de alejar o minimizar las cargas impuestas por el tránsito de la subrasante.¹¹

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).
16. INTERBITUMEN. *P a v i m e n t o s*. (2018).
19. IDU. *CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUBBASE IDU 400-11* Página 1 de 22. 1–22 (2011).
20. Papagiannakis, A. T. & Masad, E. A. *Pavement Design and Materials*. (2017).

6.1.3.3.2. Sub - Base Granular

Esta capa granular en una estructura de pavimento que se encuentra por debajo de la capa de base granular, y generalmente la encontramos colocada sobre la subrasante, conformada por materiales granulares no tratados. Esta capa está compuesta por materiales naturales obtenidos por medio del proceso de trituración; se diferencia de la capa base en las propiedades de plasticidad, graduación y capacidad de soporte, ya que las especificaciones de la capa sub base son menos restrictivas.¹⁹

6.1.3.3.3. Base Granular

En una estructura de pavimento usualmente encontramos la capa de base granular debajo de la carpeta asfáltica; la base granular está compuesta de materiales granulares colocados sobre la subbase; sin embargo, en algunos casos se puede construir la capa de base directamente sobre la subrasante, dependiendo del comportamiento mecánico y las condiciones de tráfico de la zona.

Los materiales que componen esta capa, requieren de una mayor regulación en las propiedades de plasticidad, graduación y resistencia, en comparación con la capa de subbase.¹⁹

6.1.3.3.4. Concretos Asfálticos

Esta capa hace referencia la capa de rodadura en la estructura del pavimento; en los pavimentos flexibles, esta capa se constituye de materiales pétreos, con la implementación de productos asfálticos, los cuales, cumplen la función de aglutinante.¹⁴

14. Yoder, E. J. & Witczak, M. W. *Principles of Pavement Design*. (A Wiley-Interscience publication, 1991).
19. IDU. CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUBBASE IDU 400-11 Página 1 de 22. 1-22 (2011).

Esta capa debe brindar la menor permeabilidad posible con la finalidad de evitar que se filtre gran cantidad de agua superficial hacia las capas inferiores.¹¹

6.1.4. Propiedades de los Granulares

6.1.4.1. Composición

La composición de los materiales granulares se considera como la clasificación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados tanto fino como grueso. Para determinar esta proporción se emplea el ensayo INV E – 213 del INVIAS y se realiza por medio de tamizado.²¹

6.1.4.2. Durabilidad

La durabilidad hace referencia a la propiedad que tiene un material de permanecer inalterable y seguir en funcionalidad con el paso del tiempo, lo que se relaciona a la solidez de este; en los materiales granulares la durabilidad se determina de acuerdo al ensayo de Solidez de los Agregados Frente a la Acción de Soluciones de Sulfato de Sodio o de Magnesio (INV E - 220), establecido por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).²¹

6.1.4.3. Dureza

La dureza es la propiedad que tienen algunos materiales con relación a la capacidad que estos presentan al resistir deformaciones o alteraciones en su superficie;²¹ el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) establece diferentes ensayos para determinar la dureza de los materiales granulares, tanto para la capa subbase como para la capa base, estas normas son:

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).
21. INVIAS. Sección 200. (2013).

- Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½”) por medio de la máquina de los ángeles (INV E - 218).
- Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval (INV E - 238).
- Determinación del valor del 10% de finos (INV E - 224), este método se realiza para evaluar la resistencia mecánica.

6.1.4.4. Geometría de las partículas

Esta propiedad hace referencia a la forma y disposición que presentan las partículas granulares;²¹ para determinar estas características del material granular se emplean los ensayos establecidos por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), los cuales corresponden:

- Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras (INV E - 230).
- Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E - 227).
- Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) (INV E - 239).

6.1.4.5. Limpieza

Esta propiedad se relaciona con la ausencia de impurezas, como materia orgánica u otras sustancias contaminantes, en los materiales granulares. “Todos los materiales granulares, independientemente de

21. INVIAS. Sección 200. (2013).

su procedencia, deberán encontrarse exentos de materias vegetales, basura, terrones de arcilla u otras sustancias incorporadas que puedan resultar ambientalmente nocivas o inconvenientes para el buen comportamiento de la capa del pavimento”.^{19,21,22}

De acuerdo con las normas expuestas por el Instituto Nacional de Vías, existen diferentes ensayos para determinar esta propiedad:

- Determinación del límite líquido de los suelos (INV E - 125).
- Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos (INV E - 126).
- Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E - 133).
- Valor de azul de metileno en agregados finos (INV E - 235).
- Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados (INV E - 211).

6.1.4.6. Resistencia

Esta propiedad mecánica hace referencia a la capacidad que tiene un material de oponerse a fuerzas aplicadas sobre el mismo sin presencia de deformaciones o rotura de éste; la determinación de la resistencia de los materiales granulares se realiza por medio del ensayo de CBR (California Bearing Ratio), el cual, de acuerdo a la norma establecida por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) corresponde al ensayo INV E - 148: CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.²²

6.1.5. Asfaltos

El asfalto es un material visco-elástico con propiedades ligantes y aglutinantes, precisamente por esta razón es que se utiliza para mezclas de concretos, el cual está compuesto principalmente por hidrocarburos; presenta propiedades de consistencia semi sólida a temperaturas

19. IDU. CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUBBASE IDU 400-11 Página 1 de 22. 1–22 (2011).

21. INVIAS. Sección 200. (2013).

22. INVIAS. Sección 100. *Especificaciones Gen. construcción carreteras y normas Ens. para Mater. carreteras* **100**, 185–206 (2013).

ambientales ordinarias o bajas, por otro lado, al incremento de temperatura tiende a pasar a un estado de liquidez; su color representativo es el negro.²³

El asfalto es un material residual que proviene de la refinación del petróleo; este material también se puede formar en depósitos naturales debido a procesos de destilación natural a lo largo de millones de años, de los cuales, algunos se encuentran libres de impurezas y otros se mezclan con minerales, agua y otras sustancias del suelo que se conocen como crudos naturales.¹¹

6.1.5.1. Propiedades de los Asfaltos

Métodos para evaluar la consistencia del cemento asfáltico en función de la temperatura.²⁴

6.1.5.1.1. Viscosidad (60 - 135)

Se utiliza para evaluar la consistencia del cemento asfáltico a temperaturas altas de mezclado en planta.

La viscosidad se entiende como la propiedad que tiene un líquido de fluir cuando se le aplica una fuerza; aquellas sustancias con alta viscosidad presentan mayor resistencia a fluir, en comparación a un líquido de baja viscosidad, en otras palabras, es la resistencia que ofrece un fluido a la deformación, a mayor viscosidad en un líquido, más lento será su movimiento; este parámetro es inversamente proporcional a la temperatura, es decir, a mayor temperatura, menor viscosidad.²⁵

En las mezclas asfálticas se miden dos viscosidades de acuerdo a la temperatura, las cuales corresponden a 60°C y 135°C.

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).

23. Arenas, H. *Tecnología del cemento asfáltico*. 304 (1999).

24. Salazar Delgado, J. *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). Métodos y Mater.* 1, 25–38 (1969).

25. INVIAS. Sección 700-800. (2013).

La viscosidad a 60°C se utiliza para determinar un rango para la producción y colocación de las mezclas asfálticas de acuerdo a la temperatura, donde se analiza el efecto de esta última sobre el comportamiento del material.

La viscosidad a 135°C, al igual que la anterior, determina el comportamiento del material con relación a la temperatura, pero esta, analiza las condiciones adecuadas para el almacenamiento, transporte y bombeo de la mezcla.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), existen diferentes ensayos para determinar la viscosidad del asfalto:

- Viscosidad Saybolt de Asfaltos (INV E - 714).
- Viscosidad Cinemática de Asfaltos (INV E - 715).
- Determinación de la Viscosidad del Asfalto Empleando Viscosímetros Capilares de Vacío (INV E -716).
- Determinación de la Viscosidad del Asfalto Empleando Viscosímetro Rotacional (INV E - 717).
- Viscosidades Saybolt Furol de Asfaltos a Temperaturas Elevadas (INV E - 719).

6.1.5.1.2. Ductilidad

La ductilidad hace referencia a la propiedad que tienen los asfaltos de estirarse antes de sufrir rotura, bajo condiciones controladas; los asfaltos dúctiles poseen mejores propiedades aglomerantes, pero, una ductilidad muy elevada repercute en que el asfalto sea susceptible a cambios de temperaturas, lo que conlleva a deformaciones.²⁵

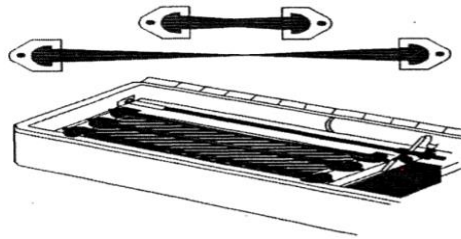
25. INVIAS. Sección 700-800. (2013).

El ensayo para determinar la ductilidad de un material asfáltico corresponde al 702 del INV E -13, donde, se define a la ductilidad como la longitud máxima a la cual se estira dicha probeta momentos antes de su rotura y sirve para determinar las propiedades a tensión de los materiales bituminosos.²⁵

Se considera que, si un asfalto tiene un bajo nivel de ductilidad, este tendrá propiedades adhesivas y un deficiente comportamiento en servicio.¹²

En la ilustración 7, se observa el mecanismo con el cual se desarrolla el ensayo de ductilidad.

Ilustración 7. Medida de la Ductilidad.



Fuente: Arenas, L. H. L. (1999). Tecnología del Cemento Asfáltico¹²

6.1.5.1.3. Consistencia

Los asfaltos son materiales que se encuentran estrechamente ligados a los cambios de temperatura, por lo cual se consideran termoplásticos, los cuales se licúan gradualmente a elevadas temperaturas. La consistencia o dureza es la propiedad de los asfaltos que se describe como el grado de fluidez o plasticidad de estos materiales a una temperatura dada.²⁵

12. Arenas Lozano, H. L. 1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES. 1-41 (1999).
25. INVIAS. Sección 700-800. (2013).

Para determinar la consistencia de los asfaltos, existen ensayos diseñados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), los cuales corresponden: Penetración de los Materiales Bituminosos (INV E - 706) y Consistencia de los Cementos Asfálticos Mediante el Flotador (INV E - 711).²⁵

6.1.5.1.4. Pureza

Esta propiedad del asfalto consiste en el porcentaje de sustancias o elementos contaminantes indebido en la mezcla, en donde la presencia de estos, que se obtiene en el proceso de refinería, son muy bajos en los cementos asfálticos.

Normalmente la mezcla asfáltica no presenta humedad (impurezas) al salir de la refinería, pero puede adquirirla en el proceso de transporte por medio de los tanques donde es almacenada.

La problemática de que la mezcla asfáltica contenga impurezas como el agua, radica en la producción de espumas cuando este es sometido a temperaturas elevadas.²⁵

El Instituto Nacional de Vías especifica las normas de los ensayos que se deben realizar a los materiales empleados para la construcción de carreteras, en los cuales, se encuentra el ensayo de Determinación del Contenido de Agua en los Materiales Bituminosos por Destilación (INV E -704); este ensayo determina la existencia de impurezas o contaminantes en el producto asfáltico, para asegurarse de que no se produzca espuma al someter el producto a altas temperaturas como consecuencia de la presencia de estos elementos indebidos.²⁵

25. INVIAS. Sección 700-800. (2013).

6.1.5.1.5. Seguridad

La espuma que se puede generar debido a la presencia de contaminantes en la mezcla asfáltica, genera un riesgo para la seguridad, por lo que se requiere que el asfalto no produzca dicha espuma.

Al someter el asfalto a temperaturas elevadas despiden vapores que arden en presencia de una chispa o llama, la temperatura a que esto se evidencia es usualmente mayor a la del trabajo en la construcción del pavimento; pero debido a que se requiere de mayor precisión es necesario determinar el punto de inflamación del asfalto, para obtener así un margen de seguridad adecuado.²⁵

El punto de inflamación corresponde a la temperatura a la cual se puede calentar el asfalto sin que se presente peligro de incendio por presencia de una chispa.

Para determinar el punto de inflamación de los productos pétreos, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), establece la norma INVE -709, la cual corresponde a el ensayo de Punto de Inflamación y de Combustión mediante la Copa Abierta Cleveland.²⁵

6.1.6. Agregados Pétreos

En Pavimentos, el concepto de agregados pétreos hace referencia a un “conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas, finos y/o fillers (naturales o triturados)” ¹¹, estos materiales son empleados en la construcción de la estructura de pavimentos, para lo cual, deben cumplir con ciertas características que requieren cada una

11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).
25. INVIAS. Sección 700-800. (2013).

de las capas de dicha estructura, dichas propiedades se relacionan con la durabilidad, textura y resistencia mecánica; estas exigencias van de acuerdo al diseño de la estructura del pavimento, el cual, se realiza de acuerdo al tipo de carretera (primaria, secundaria, terciaria) y al nivel y tipo de tránsito que circula sobre dicha vía; los agregados pétreos deben cumplir con las condiciones de diseño, para que de esta forma las capas de la estructura del pavimento soporten la carga impuesta sobre estas y por ende se dé un adecuado funcionamiento del pavimento.

6.1.7. Base Granular

Una base granular es una capa compuesta de material granular normalmente grueso, que tiene capacidad de resistir presiones altas debido a su resistencia a deformaciones; además, debido al tamaño de las partículas que la conforman, favorece el drenaje de la estructura del pavimento. Esta base se encuentra ubicada entre la capa de rodadura y la sub base granular en la estructura de un pavimento.

En la actualidad es común que dentro de los materiales que conforman la base granular halla presencia de un porcentaje de triturados como arenas y arenas finas, ya que estos materiales aportan mayor calidad y resistencia a la base.¹⁹

6.1.7.1. Tipos de bases granulares

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) definen tres tipos de base granular: 1. BG-A, 2. BG-B y 3.-BG C, las cuales se clasifican en función de la calidad de los agregados o materiales pétreos que las conforman. El uso de una u otra base granular depende del nivel de tránsito que presenta la vía; en las

19. IDU. CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUBBASE IDU 400-11 Página 1 de 22. 1-22 (2011).

tablas 1 y 3 se presenta el uso típico de las bases granulares de acuerdo con el INVIAS y el IDU respectivamente:²⁶

Tabla 1. Uso típico de las diferentes clases de base granular

CLASE DE BASE GRANULAR	NIVEL DE TRÁNSITO
Clase C	NT1
Clase B	NT2
Clase A	NT3

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS) – Artículo 330 – 13.⁹

El INVIAS en el Capítulo 1 – Artículo 100 establece ciertas condiciones para los niveles de tránsito, los cuales se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2. Niveles de tránsito

NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, N_{80kN} , MILLONES
NT1	$N_{80kN} \leq 0.5$
NT2	$0.5 < N_{80kN} \leq 5.0$
NT3	$N_{80kN} > 5.0$

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS) – Artículo 100 – 13.⁹

De acuerdo con la tabla anterior (Tabla 2) se observa que el nivel de tránsito de una vía esta dado por el número de ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño.

9. INVIAS. Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. 1–8 (2013).

26. -IDU, I. de D. U. Especificaciones Técnicas Generales De Materiales Y Construcción, Para Proyectos De Infraestructura Vial Y De Espacio Público Para Bogotá D.C. 2010–2011 (2011).

Tabla 3. Correspondencia entre clases de capas granulares, el tipo de pavimento y las categorías de tránsito

Tipo de Capa	Categorías de Tránsito			
	T0 - T1	T2 - T3	T4 - T5	PEATONAL (1)
Pavimento Asfáltico				
Base Granular	BG_C	BG_B	BG_A	
Subbase Granular	SBG_C	SBG_B	SBG_A	
Pavimento de Losas de Concreto de Cemento Pórtland				
Base Granular	BG_B	BG_A	NA	
Subbase Granular	SBG_C	SBG_B	SBG_A	
Andenes y Estructuras peatonales				
Base Granular				NA
Subbase Granular				SBG_PEA

Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) – Sección 400 – 11.¹⁹

6.1.7.2. Base tipo C

La base granular de clasificación C, como se puede observar en las tablas de especificaciones del INVIAS y el IDU (Tablas 1 y 3 respectivamente), se emplea para vías con niveles de tránsito 1, que corresponde a un número igual o inferior a $0,5 \times 10^6$ de ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño.

Los materiales que conforman las bases granulares tienen que cumplir ciertos requisitos de calidad, estos requisitos varían de acuerdo al tipo de base; tanto el IDU como el INVIAS establecen estos requisitos dentro de sus normas; a continuación, se presentan los requisitos establecidos por las normas colombianas para los agregados que conforman las bases granulares, así como los ensayos que permiten determinar estas propiedades en los materiales granulares:

19. IDU. CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUBBASE IDU 400-11 Página 1 de 22. 1-22 (2011).

Tabla 4. Requisitos de los agregados para bases granulares INVIAS

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones - 100 revoluciones	E-218	40 8	40 8	35 7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	30	25
Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos - Valor en seco, mínimo (kN) - Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E-224	- -	70 75	90 75
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	-	-
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	3	0	0
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	30	30	30
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	2	2	2
Geometría de las Partículas (F)				
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	35	35	35
Caras fracturadas, mínimo (%) - Una cara - Dos caras	E-227	50 -	70 50	100 70
Angularidad de la fracción fina, mínimo (%)	E-239	-	35	35
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 330.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión.	E-148	≥ 80	≥ 80	≥ 95

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS) – Artículo 330 – 13.⁹

9. INVIAS. Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. 1–8 (2013).

Tabla 5. Requisitos de los agregados para bases granulares IDU

Ensayo		Norma de Ensayo	Clase de Base Granular		
			BG_C	BG_B	BG_A
Dureza					
Desgaste Los Ángeles	- En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	40	40	35
Micro Deval, % máximo	- Agregado Grueso	INV-E-238-07	30	25	20
10% de finos	- Valor en seco, kN mínimo - Relación húmedo/seco, % mínimo	INV-E-224-07	60 75	75 75	100 75
Durabilidad					
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18
Limpieza					
Límite Líquido, % máximo		INV E-125 -07	25	25	25
Índice de Plasticidad, % máximo		INV E-126-07	3	No plástico	No plástico
Equivalente de Arena, % mínimo (1)		INV E-133-07	20	20	20
Valor de Azul de Metileno, máximo		INV-E-235-07	10	10	10
Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo		INV E-211-07	2	2	2
Geometría de las Partículas					
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara - 2 caras	INVE-227-07	60 40	85 60	85 60
Índice de Aplanamiento, % máximo (2)		INV E-230-07	35	35	35
Índice de Alargamiento, % máximo (3)		INV E-230-07	35	35	35
Angularidad del Agregado Fino, % mínimo		INV-E-239-07	35	35	35
Capacidad de Soporte					
CBR, % mínimo - Referido al 100 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142-07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión.		INV E-148-07	80	100	100

Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) – Sección 400 – 11.¹⁹

Como se puede observar en las tablas anteriores (Tabla 4 y 5), las especificaciones del IDU y del INVIAS tienen valores iguales o similares para los requisitos que deben cumplir los agregados para los

diferentes tipos de bases granulares; cabe resaltar que las normas que aparecen en la tabla de requisitos del IDU (tabla 5) no están actualizadas, ya que el INVIAS actualizo sus normas en el año 2013 (INV E – 13) y la última actualización que se tiene del IDU es del año 2011.

De acuerdo con las especificaciones del IDU y el INVIAS se tiene que los materiales granulares o agregados para una base granular tipo C, deben cumplir con los parámetros de calidad expuestos en la siguiente tabla (Tabla 6):

Tabla 6. Especificaciones de los materiales granulares para una BG-C

BASE GRANULAR - C							
Característica	Ensayo	Norma		INVIAS	IDU	UNIDAD	max/min
DUREZA	Desagaste de los angeles (500 revoluciones)	INV E -	218	40	40	%	máximo
	Desagaste de los angeles (100 revoluciones)			8	-		
	Degradación por abrasión en el Micro-Deval	INV E -	238	-	30	%	máximo
	10% de finos (en seco)	INV E -	224	-	60	kN	mínimo
	10% de finos (Relación húmedo/seco)			-	75	%	
DURABILIDAD	Perdidas en ensayo de solidez en sulfato de sodio	INV E -	220	12	-	%	máximo
	Perdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio			18	18		
LIMPIEZA	Limite líquido	INV E -	125	25	25	%	máximo
	Índice de plasticidad	INV E -	125 y 126	3	3	%	máximo
	Equivalente de arena	INV E -	133	30	20	%	mínimo
	Valor de azul de metileno	INV E -	235	10	10	-	máximo
	Terrones de arcilla y partículas deleznales	INV E -	211	2	2	%	máximo
GEOMETRIA DE LAS PARTÍCULAS	Índices de alargamiento y aplanamiento	INV E -	230	35	35	%	máximo
	Caras fracturadas (una cara)	INV E -	227	50	60	%	mínimo
	Caras fracturadas (dos cara)			-	40		
	Angularidad de la fracción fina	INV E -	239	-	35	%	mínimo
RESISTENCIA	CBR	INV E -	148	<u>≥ 80</u>	80	%	mínimo

Fuente: Autores

6.1.9. Estabilización

La estabilización de un material es la incorporación de unos determinados elementos, con el fin de modificar las características como resistencia y durabilidad del material para mejorar su

comportamiento frente a agentes externos como los ambientales, mediante la adicción de un producto de manera mecánica.²⁷

6.1.10. Bases Estabilizadas

El termino de base estabilizada se refiere al tratamiento que produce mejoras permanentes a una capa del suelo, aumentando la capacidad estructural y generando una estructura de pavimento más resistente; estas mejoras a la capa se realizan mediante la adición de materiales alternos por medio de la mezcla de estos aditivos con los materiales granulares que componen la base, consiguiendo un material homogéneo; “se requiere un diseño de mezcla de laboratorio para optimizar el tipo y la cantidad de aditivo a incorporar que permita que la mezcla cumpla con los requisitos de rendimiento de resistencia, elasticidad y durabilidad”²⁸.

6.1.10.1. Ventajas de la estabilización de bases

“La estabilización de las bases es una técnica eficaz de rehabilitación del pavimento que proporciona una base sólida y duradera capaz de soportar una amplia gama de cargas de tráfico”²⁹.

Algunas de las ventajas de los procesos de estabilización de bases son:

- Mejorar el módulo (rigidez) del material para minimizar la deformación permanente debido a la carga de tráfico.
- Mejorar la estabilidad del material a la carga del tráfico y la humedad.
- Mejorar la durabilidad del material para ampliar la vida útil de la estructura del pavimento.

27. VISE. CARACTERISTICAS DE LAS BASES ESTABILIZADAS.

28. Wegman, D. E., Sabouri, M., Korzilius, J., Kuehl, R. & Intertec, B. Base Stabilization Guidance and Additive Selection for Pavement Design and Rehabilitation. 36 (2017).

29. millergroup.ca. B a s e t a b i l i z a t i o n .

6.1.10.2. Tipos de estabilización

Existen tres tipos de estabilización de bases:³⁰

1. Mecánica: Este tipo de estabilización consiste en que el material estabilizador que se adiciona a los agregados que conforman la capa base provienen de materiales reciclados.
2. Química: La estabilización química se realiza agregando materiales pulverizados como cemento, cal, cenizas volátiles, entre otros.³⁰

Con este tipo de estabilización, las ganancias de fuerza se logran por medio de la unión entre partículas; los aditivos químicos deben ser incorporados a la mezcla en un rango donde se produzca mayor resistencia y estabilidad sin generar efectos adversos, como la propagación de grietas en la capa de rodadura del pavimento debido a la rigidez y fragilidad que se puede ocasionar en la base como consecuencia a la incorporación de demasiado agente estabilizador; por otro lado, una cantidad insuficiente del aditivo no proporciona la adecuada unión de las partículas que conforman la base.²⁸

3. Bituminosa: Este tipo de estabilización se logra mediante la adición de asfalto líquido, emulsión de asfalto o asfalto espumado, el cual recubre las partículas de agregado y genera adhesión entre estas; este tipo de aditivos “deben incorporarse en una gama que impermeabilice el agregado con suficiente asfalto”²⁸.

28. Wegman, D. E., Sabouri, M., Korzilius, J., Kuehl, R. & Intertec, B. Base Stabilization Guidance and Additive Selection for Pavement Design and Rehabilitation. 36 (2017).
30. MCA. TECHNICAL BULLETIN. 2, 2–4

6.1.10.3. Importancia de los agregados para el proceso de estabilización

Los agregados que conforman la capa base juegan un papel importante en el proceso de estabilización, ya que las propiedades de estos determinan la calidad y el rendimiento de la mezcla de base; estos materiales deben estar debidamente clasificados. En Colombia las normas que especifican las propiedades que deben tener los agregados para bases granulares son el INVIAS-13 y el IDU-11, especificaciones que se nombrando anteriormente (numeral 6.1.8.2). Además de los requisitos establecidos por el INVIAS y el IDU, los agregados para bases estabilizadas “deben estar razonablemente libres de sustancias nocivas, como arcilla, lutita, carbón, coque, vegetación u otros desechos”³¹.

6.1.10.1. Materiales empleados para la estabilización de bases

En la práctica se han empleado diversos materiales para la estabilización de bases granulares, entre ellos tenemos la cal, el cemento, entre otros; estos procesos se realizan con el fin de mejorar las propiedades de la base y que a su vez los tratamientos desarrollados sean amigables con el medio ambiente.

6.1.10.1.1. Cemento

El cemento es un material comúnmente utilizado en los procesos de estabilización de bases, debido a que este tipo de materiales mezclado con los agregados, agua y una adecuada compactación, logran desarrollar una gran fuerza de cohesión entre las partículas de la mezcla, en donde el cemento aporta rigidez a la base, por lo cual, se considera que esta funciona como una losa,

31. Federal Highway Administration. STABILIZED BASE. (2016). Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/app5.cfm>.

transfiriendo las cargas producidas por el tráfico vehicular a una superficie mayor, lo que la hace estable ante las cargas que le sean impuestas. El porcentaje de cemento que se mezcla no debe ser muy elevado para que de esta forma la rigidez sea mínima con el fin de permitir la adaptación de la base a deformaciones por las cargas recibidas, “su proporción (dosificación) debe ser suficiente para conferir a la base ciertas cualidades mínimas de insusceptibilidad, resistencia mecánica y durabilidad”³².

El uso del cemento como material de estabilización o mejoramiento de propiedades de las diferentes capas de un pavimento “data de 1908 cuando J.H. Aimes patentó el tratamiento de materiales con cemento a ser utilizados en caminos”³³, cuyos porcentajes de cemento que se implementaban varían entre el 5% y 15%, para lo cual, se utilizaban porcentajes bajos para el caso de arenas y gravas y los más altos para suelos cohesivos.

La estabilización con cemento de la capa base que conforma la estructura de un pavimento genera “una gran cantidad de beneficios, dentro de ellos se puede mencionar la disminución considerable en la porosidad y plasticidad de los materiales respecto a sus condiciones iniciales”³³, además, el beneficio más importante que se atribuye a la estabilización con cemento, es el incremento de la resistencia a la deformación de la capa, proporcionando a su vez estabilidad y durabilidad; sin embargo la estabilización con cemento también puede generar efectos no deseados, debido a que un alto porcentaje de adición de este material, puede provocar un incremento en la rigidez de la capa, “cambiando el comportamiento

32. Rocci, S. Bases estabilizadas con cemento. *Inf. la Construcción* 17, 79–99 (1964).

33. Flores Loza, G. *EFEECTO DE FATIGA EN UN MATERIAL DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO (PAVIMENTO FLEXIBLE)*. (2011).

del material de uno idealizado como dúctil a uno tipo frágil”³³, formando grietas que se pueden proyectar a la superficie del pavimento y conllevar a una falla de servicio con el tiempo como consecuencia a la contracción del material.^{34,40,41}

Para evitar los agrietamientos por rigidez de la base estabilizada con cemento, se debe hacer el proceso de curado por un cierto tiempo antes de abrirse al tránsito; para esto es fundamental la hidratación del cemento, ya que a medida que el cemento se hidrata, el material adquiere mayor rigidez.⁴⁰

Una forma de reducir la adición de proporciones altas de cemento a los granulares y que de igual forma se logre alcanzar una resistencia determina, es mediante el incremento en la energía de compactación, lo que a su vez genera una reducción en los índices de contracción de la mezcla, por lo cual, se disminuye los riesgos de la presencia de agrietamientos en la capa como consecuencia de la rigidez de la misma. Una buena compactación depende de la compactibilidad de los agregados que “depende de la textura, forma, dureza y gradación”³⁵ de los mismos. “Al analizar en laboratorio la razón de variación de la densidad en función de la energía, se puede determinar comparativamente la “facilidad de compactación” de distintos materiales (gravas, tobas, suelos arenosos, pavimentos triturados), usando como humedad de compactación la envolvente de los óptimos de las curvas Próctor”³⁵.

Otras de las ventajas que se presentan en una base estabilizada con cemento consisten en: la disminución del agrietamiento por

33. Flores Loza, G. *EFEECTO DE FATIGA EN UN MATERIAL DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO (PAVIMENTO FLEXIBLE)*. (2011).

34. Wu, Z., Liu, Y. & Intaj, F. Minimizing Shrinkage Cracking in Cement-Stabilized Bases through Micro-Cracking. (2018).

35. Arce, M. Bases estabilizadas con cemento: Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes. *Programa Infraestruct. del Transp. - Lanamme Univ. Costa Rica* 2, 7 (2011)

40. Young, T. B. (2007). Early-age strength assessment of cement-treated base materials. Master Science Thesis. Briham Young University.

41. Gaspard, K.J. (2002). In-Place Cement Stabilized -Base Reconstruction Techniques. Interim Report;” Construction and Two Year Evaluation”. Louisiana Transportation Research Center. LTRC Project No. 95-3GT.

fatiga de la capa de rodadura debido a la reducción de la deflexión vertical y la deformación por tensión en la carpeta asfáltica; también se reduce la falla de la capa de subrasante ya que esta soporta en menor medida los esfuerzos producidos por el tránsito vehicular, como consecuencia de que la capa base estabilizada absorbe gran proporción de estos esfuerzos.³²

6.1.10.1.1.1. Dosificación

En el proceso de estabilización de bases es fundamental determinar la dosificación de material estabilizador que se va a adicionar a los agregados que conforman la base; para el caso del cemento, existen diversos métodos para el diseño de la mezcla, uno de estos métodos es el método AASHTO, el cual se describe a continuación:

- Método AASHTO

Este método consiste en determinar la granulometría del material y en base a esto se realiza una clasificación de acuerdo con la tabla 7; Con esta clasificación se entra en la tabla 8 y se determina el porcentaje de cemento que se debe implementar.

32. Rocci, S. Bases estabilizadas con cemento. *Inf. la Construcción* 17, 79–99 (1964).

Tabla 7. Clasificación AASHTO

Clasificación General			Materiales granulares 35% o menos pasan la malla 200							Materiales limosos y arcillosos más del 35% pasa la malla No 200				
Grupos			A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
			A-1-a	a-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Análisis por mallas.	10	50 Max												
% que pasa la malla	40	30 Max	50 Max	51 Min										
No	200	15Max	25 Max	10 Max	35 Max	35 Max	35 Max	35 Max	36 Min	36 Min	36 Min	36 Min	36 Min	
Característica de la fracción que pasa la malla 40	LL			40 Max		41 Min	40 Max	41 Min	40 Max	41 Min	40 Max	41 Min	41 Min	
	LP	6 Max	6 Max	NP	10 Max	10Max	11 Min	11 Min	10 Max	10 Max	11 Min	11 Min	11 Min	
Índice de grupo		0	0	0	0	4 Max	8 Max	4 Max	8 Max	12 Max	16 Max	20 Max	20 Ma	
Tipo usual de materiales constituyentes			Piedra Grava Arena		Arena		Arena limosa o arcillosa, arena			Suelos limosos		Suelos arcillosos		

Nota: En la división A-7, cuando IP > 30, el grupo A-7-5. Si el IP < 30 el grupo es A-7-6

Fuente: Duque Escobar, G(2003).³⁶

Como se observa en la tabla anterior (tabla 7), la AASHTO clasifica el suelo en 7 clases y estos están subdivididos en otros más, para tener un total de 12 categorías.³⁶

a) Grueso granulares: 35% o menos pasa el T200 comprende

A-1, si menos del 20% pasa el T₂₀₀ y menos del 50% pasa el T₄₀.

A-2, si menos del 35% pasa el T₂₀₀, (limoso o arcilloso).

A-3, si menos del 10% pasa el T₂₀₀ y 51% o más pasa el T₄₀

b) Suelos finos granulares (grupo limo arcilla): más del 35% pasa el T₂₀₀

A-4 si IP ≤ 10 (limo) y LL ≤ 40%

A-5 si IP ≤ 10 (limo) y LL ≥ 41%

36. Duque Escobar, G. . Ver 3.4 en granulometría Depende de WL y el IP. Ver línea A en la Carta de 78. 78–88 (2003).

A-6 si $IP \geq 11$ (arcilla) y $LL \leq 40\%$

A-7 si $IP \geq 11$ (arcilla) y $LL \geq 41\%$

Donde:

T: Tamiz

IP: Índice de Plasticidad → De acuerdo a las normas colombianas, se determina con el ensayo INV E -125 y INV E- 126

LL: Limite Liquido De acuerdo a las normas colombianas, se determina con el ensayo INV E -125

Nota: La información correspondiente la clasificación de la ASSHTO fue tomada de:

<http://bdigital.unal.edu.co/53252/97/clasificaciondesuelos.pdf> ³⁶

Tabla 8. Porcentajes de cemento iniciales tomando en cuenta el handbook de suelo-cemento de la AASHTO

Clasificación AASHTO	Porcentaje de cemento con respecto a peso
A-1-a	5
A-1-b	6
A-2	7
A-3	9
A-4	10
A-5	10
A-6	12
A-7	13

Fuente: Duque Escobar, G(2003). ³⁶

6.1.10.1.1.2. Normas colombianas para la estabilización de bases con cemento

En Colombia, el Instituto de Desarrollo Urbano en la sección 420-11 (Capas de Material Granular Estabilizado con Cemento) especifica: los requisitos que deben cumplir los materiales granulares, los ensayos que se deben realizar para determinar las

36. Duque Escobar, G. . Ver 3.4 en granulometría Dependiente de WL y el IP. Ver línea A en la Carta de 78. 78–88 (2003).

propiedades de la base estabilizada con cemento y la cantidad de pruebas que se debe realizar.

El IDU define diferentes clases de capas de material granular estabilizadas con cemento, las cuales tenemos: Clase A (GEC_A), Clase B (GEC_B), Clase C (GEC_C) Y Clase D (GEC_D), las clases de capas de material granular mencionadas anteriormente, se definen en “función de la importancia de la vía, del nivel de tránsito, del tipo de subrasante, del tipo de pavimento y de la posición de la capa dentro de la estructura del pavimento”³⁷ y su clasificación se presenta en la tabla 9.

Tabla 9. Uso de capas de materiales granulares estabilizados con cemento

Tipo de Capa	Categorías de Tránsito		
	T0 – T1	T2 – T3	T4 – T5
Pavimento Asfáltico			
Capa de Base	GEC_B, C ó D	GEC_B ó C	GEC_A ó B
Capa de Subbase	GEC_C ó D	GEC_C ó D	GEC_B ó C
Pavimento de Losas de Concreto de Cemento Pórtland			
Capa de Base	GEC_B ó C	NA	NA
Capa de Subbase	GEC_C ó D	GEC_C ó D	GEC_A, B ó C

NA = No Aplica.

Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) – Sección 420 – 11.²⁶

Para la construcción de la capa de material granular estabilizado, se debe determinar primeramente la densidad máxima de referencia, “en función del tipo de material granular por estabilizar, del nivel de tránsito, del tipo de pavimento y de la posición de la capa dentro de la estructura del pavimento”³⁷; además, el diseño de las probetas necesarias para evaluar las propiedades de la mezcla, se deben realizar con la misma densidad máxima de referencia. En la tabla 10, se presenta el ensayo correspondiente para determinar

26. -IDU, I. de D. U. Especificaciones Técnicas Generales De Materiales Y Construcción, Para Proyectos De Infraestructura Vial Y De Espacio Público Para Bogotá D.C. 2010–2011 (2011).
 37. Cemento, E. C. O. N. Sección: 420-11 proceso especificación técnica: 1–27

esta densidad de acuerdo a la clase de material granular; estos ensayos se deben realizar de acuerdo a la norma actual, que corresponde a la del 2013.

Tabla 10. Densidad máxima de referencia para la construcción de materiales capas granulares estabilizadas con cemento.

Característica	Clase de Material Granular para estabilizar con cemento	
	GEC_C ó D	GEC_A ó B
Densidad Máxima de Referencia (densidad máxima correspondiente al ensayo de compactación indicado, efectuado sobre la mezcla)	Proctor Estándar INV E-141-07	Proctor Modificado INV E-142-07

Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) – Sección 420 – 11.²⁶

De acuerdo con el IDU el porcentaje mínimo de cemento que se debe emplear en capas de material granular para el proceso de estabilización, no debe ser “inferior al tres por ciento (3%) en peso, respecto del total del material granular seco”³⁷. Además, el número de probetas para desarrollar los ensayos de resistencia debe ser 3 por tipo de ensayo y por contenido de cemento: “3 para compresión encofinada y 6 para tracción indirecta (3 para ensayo sin inmersión y 3 para ensayo con inmersión); se deben analizar al menos 3 contenidos de cemento”³⁷.

6.1.10.1.2. Cal

Cualquier proyecto de construcción depende en gran medida de la calidad de los suelos, para que tenga una vida útil con mayor duración y sin presentar ninguna falla en un futuro. Los suelos inestables crean problemas no deseados significativos en una estructura de pavimento como hundimientos y grietas, por tal motivo

26. -IDU, I. de D. U. Especificaciones Técnicas Generales De Materiales Y Construcción, Para Proyectos De Infraestructura Vial Y De Espacio Público Para Bogotá D.C. 2010–2011 (2011).
37. Cemento, E. C. O. N. Sección: 420-11 proceso especificación técnica: 1–27

el diseño y nuevas técnicas de construcción para transformar químicamente los suelos con aditivos como la cal, que se emplea actualmente a diferentes proporciones (dosificación) con el fin de generar suelos estabilizados dependiendo del uso que se requiere para luego ser empleados en el diseño de un pavimento.³⁸

La cantidad de cal que se adicione en los suelos depende de su fin, por ejemplo, una gran cantidad de cal se emplea para la estabilización estructural permanente del suelo, en cambio, una baja cantidad de cal se usa para secar y modificar el suelo.³⁹

La estabilización con cal en los suelos cambia las características de este en gran proporción, con el fin de obtener una resistencia y estabilidad a largo plazo, en especial con todo lo relacionado a la acción del agua y el poder contrarrestar los efectos de este agente externo.³⁹

6.1.10.1.2.1. ¿Qué es la cal?

Es una sustancia alcalina de color blanco, se utiliza en la construcción como aditivo mezclada con arena en la elaboración de revestimientos o morteros. En suelos se pueden usar los siguientes tipos de cal (óxido de calcio-CaO), Cal hidratada (hidróxido de calcio-Ca (OH)₂).⁴²

La cal generalmente se utiliza para tratar suelos inestables se emplea cal alta de calcio, ya que posee un máximo de 5% de óxido o hidróxido de magnesio, aunque en algunos casos se puede utilizar la cal dolomítica que contiene de 35 a 46% de óxido o hidróxido de magnesio.^{42,43}

38. Instituto de Desarrollo Urbano & Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Estabilización con cal. 1–15 (2011).

39. INVIAS. Sección 600. *Comp. A J. Comp. Educ.* 1–5 (2013).

42. Association, N. L. (2004). *MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL*. Obtenido de ESTABILIZACIÓN Y MODIFICACIÓN CON CAL: https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf

43. Construmatica. (s.f.). *Construmatica*. Obtenido de Metaportal de arquitectura, ingeniería y construcción: La Cal es una sustancia alcalina de color blanco o blanco grisáceo que al contacto con el agua, se hidrata o se apaga, desprendiendo calor.

6.1.10.1.2.2. Estabilización de suelos con cal

La cal es utilizada en el tratamiento de suelos dependiendo del objetivo varían las cantidades de este material, según la norma INVE – 801 – 07 (RESISTENCIA DE MEZCLAS DE SUELO-CAL) nos dan unos requisitos químicos y físicos que debe cumplir la cal para que esta pueda ser utilizada como material estabilizador de suelos que son los siguientes:⁴⁴

1. El porcentaje mínimo de óxidos de calcio y magnesio (en una base no volátil) = 90.0
2. El porcentaje máximo de carbono anhidro (tomado en el punto de fabricación) = 5.0
3. El porcentaje máximo de humedad libre (tomada en el punto de fabricación) = 2.0
4. Las propiedades físicas recomendadas para la cal hidratada son: La cal no deberá tener más de 3% de retenido en el tamiz de 0.569 mm (No 30) y no más de 25% de retenido en el tamiz de 75 μ m (No 200).
5. Las propiedades físicas recomendadas para la cal viva son:
 - a. Las partículas de cal viva deben pasar el tamiz de 24.5 mm (1")
 - b. El incremento de temperatura mínimo en 20 minutos deberá ser de 30°C.
 - c. La cal viva para estabilización de suelos no tendrá un residuo de más del 10%.

La estabilización con cal cambia considerablemente las propiedades del suelo, generando una mayor vida útil del suelo en características de resistencia y estabilidad en condiciones

44. INVIAS. (2013). RESISTENCIA DE MEZCLAS DE SUELO CAL INVE – 801 – 13.

ambientales principalmente a la presencia de agua. Los suelos tratados con cal para subrasante o para bases flexibles se deberán compactar en una forma homogénea, tanto como sea posible.

La cal puede estabilizar una gama de suelos dependiendo si se combina sola o con otros materiales, dependiendo de las propiedades mineralógicas que se encuentren en el suelo podemos determinar el porcentaje que se debe suministrar de cal para que ocurra una reacción con el fin de mejorar las capas estabilizadas. Los suelos arcillosos son materiales adecuados para ser estabilizados debido a sus propiedades como el porcentaje que pasa el tamiz 200 y su índice de plasticidad, también los suelos que contienen material orgánico requieren cal.⁴⁴

6.1.10.1.2.3. Subrasante o sub bases estabilizadas:

La cal puede ser empleadas en las capas de subrasante o subbase para estabilizar suelo fino, con el fin de hacer una capa de mayor calidad en una estructura de pavimento, La estabilización de la subrasante por lo general se prepara una mezcla con una adición de cal de 3 a 6 por ciento en peso del suelo seco.⁴²

6.1.10.1.2.4. Bases estabilizadas

La cal puede estabilizar permanentemente materiales que no cumplen con los requerimientos mínimos para ser empleados como una base (la grava con arcilla, gravas "sucias", o bases contaminadas en general) que son las que contienen un 50 por ciento de material grueso retenido tamiz No. 4. La estabilización de

42. Association, N. L. (2004). *MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL*. Obtenido de ESTABILIZACIÓN Y MODIFICACIÓN CON CAL: https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf

44. INVIAS. (2013). *RESISTENCIA DE MEZCLAS DE SUELO CAL INV E – 801 – 13*.

bases es utilizada para la construcción de caminos nuevos y para la reconstrucción de caminos deteriorados, y generalmente requiere la adición de 2 a 4 por ciento de cal respecto al peso del suelo seco.⁴⁴

6.1.10.1.2.5. Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de cal.⁴²

1) Cal hidratada en polvo:

- a. Puede ser adicionada con mayor rapidez y facilidad que la lechada.
- b. Puede ser empleada para secar arcillas, pero no es tan buena como la cal viva.
- c. Las partículas que sean hidratadas con cal son finas de tal modo que puede ser un problema y no es recomendable en áreas pobladas.

2) Cal viva en seco:

- a. Economía ya que un 3 por ciento de cal viva es igual que 4 por ciento de cal hidratada.
- b. La cal viva seca es adecuada para secar suelos mojados.
- c. La cal viva requiere 32 por ciento de su peso en agua para volverse en cal hidratada y puede existir pérdida debido a la evaporación.

3) Lechada de cal:

- a. Es más fácil lograr la distribución.
- b. Su aplicación es por rociado.
- c. Se necesita menos cantidad de agua para la mezcla final.

42. Association, N. L. (2004). *MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL*. Obtenido de ESTABILIZACIÓN Y MODIFICACIÓN CON CAL: https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf

44. INVIAS. (2013). *RESISTENCIA DE MEZCLAS DE SUELO CAL INVE – 801 – 13*.

- d. Velocidad lenta de aplicación.
- e. Costos más altos debido al equipo requerido.
- f. No es recomendable en suelos muy mojados.

A escala de laboratorio también se han logrado interesantes resultados utilizando simultáneamente cemento y cal (50% de cada uno), con lo que se logra más bajos índices de contracción de fraguado (menor agrietamiento del pavimento) y mejor desempeño de materiales con altos índices de plasticidad.³⁵

6.1.10.1.3. Emulsión Asfáltica

La estabilización con emulsiones asfáltica presenta grandes mejoras y ventajas a los suelos que son las siguientes:

1. La estabilización con emulsión asfáltica es muy adaptable a la construcción por etapas en la que nuevas capas se agregan en la medida que el tráfico aumenta.
2. Como un impermeabilizante de suelos “subrasante”.
3. Mejora las características de materiales que no cumplen con los requisitos mínimos para el uso de estos suelos en una estructura de pavimento.
4. Genera una reducción a los espesores de las capas superiores.
5. Reducción de polvo.

Estas ventajas debido a las propiedades cementantes de la emulsión asfáltica es un excelente aditivo para estabilización de suelos, dependiendo del tipo de suelo que se quiere estabilizar la emulsión se comporta distinto; en suelos finos este material funciona

35. Arce, M. Bases estabilizadas con cemento: Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes. *Programa Infraestruct. del Transp. - Lanamme Univ. Costa Rica* 2, 7 (2011).

como un impermeabilizante y brinda adhesión en arenas y gravas.^{45,46}

6.1.10.1.3.1. Suelos estabilizados con emulsión asfáltica

1. Suelos finos

Los suelos finos para ser estabilizados con emulsión asfáltica dependen de sus características de plasticidad y del porcentaje de suelo que pasa el tamiz N°200. Debido a que las partículas finas necesitarían una mayor cantidad de asfalto para cubrir toda la capa de suelo fino, lo cual sería excesiva, por lo tanto, se recomienda recubrir aglomeraciones de partículas con porcentajes menores de emulsión asfáltica, con el fin de impermeabilizar esta capa evitando humedades, ya que pueden presentar problemas en un futuro como ahuellamiento.^{45,46}

2. Suelos granulares

La estabilización de suelos granulares con emulsión asfáltica cumple dos principales funciones la primera es como impermeabilizante creando una capa que previene la presencia de humedad, y la segunda es la adhesión la cual brinda una cohesión de las partículas aumentando la resistencia al cote y a la flexión.^{45,46}

Para poder conocer la cantidad de emulsión asfáltica que se necesita para estabilizar este tipo de suelos está comprendida por diversos aspectos, como el tipo de carga, factores ambientales y propiedades de los agregados. Los materiales estabilizados con emulsión asfáltica pueden utilizarse como capa de rodadura, base

45. Angulo Macedo, A. S. (2018). *ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIONES ASFÁLTICAS*. Obtenido de <https://blog.vise.com.mx/estabilizaci%C3%B3n-de-suelos-con-emulsiones-asf%C3%A1lticas>

46. Guillermo Thenoux Z, G. E. (s.f.). *Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos*.

y/o subbase, cada una de estas capas puede requerir diferentes tipos y/o cantidades de emulsión asfáltica.

Los asfálticos generalmente se utilizan en las capas de rodadura y estructuras de pavimentos de alta resistencia, y las emulsiones se usan comúnmente en bases y subbases mezcladas en planta o en sitio. Las condiciones de carga (estática o dinámica), la magnitud de carga y las condiciones climáticas (temperatura y humedad), son las que determinan el tipo y grado de asfalto o emulsión asfáltica necesaria.^{45,46}

6.1.10.1.3.2. Propiedades de los agregados: La distribución granulométrica, la capacidad de absorción y la calidad del agregado, también es un factor que debe considerarse en la selección del grado del asfalto o residuo asfáltico que se deberá utilizar en la mezcla.

6.2. Normatividad aplicada

Para el Desarrollo del proyecto de utilizaron como referencia las normas colombianas correspondientes al Instituto Nacional de Vías (INVIAS) con sus normas actualizadas correspondientes al INV E – 13; además, se empleó las del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) con la última actualización que corresponde al IDU -11

45. Angulo Macedo, A. S. (2018). *ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIONES ASFÁLTICAS*. Obtenido de <https://blog.vise.com.mx/estabilizaci%C3%B3n-de-suelos-con-emulsiones-asf%C3%A1lticas>

46. Guillermo Thenoux Z, G. E. (s.f.). *Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos*.

7. METODOLOGÍA

7.1. Tipo de investigación

La investigación que se desarrollará será de tipo exploratoria donde se analizará e investigará el adecuado uso que se le puede dar al material tratado por Geoambiental S.A.S, material el cual no ha sido analizado con anterioridad, por ende, no se tiene ningún aspecto o conocimiento con respecto a las características o propiedades que este material pueda presentar.

Este tipo de investigación “básicamente se trata de una exploración o primer acercamiento que permite que investigaciones posteriores puedan dirigirse a un análisis de la temática tratada”⁴⁷.

7.2. Fuentes de información

A continuación, se presentan las fuentes de información utilizadas para el desarrollo de la investigación:

7.2.1. Fuentes primarias

Normas colombianas con relación a los agregados pétreos y el diseño de pavimentos, dentro de las cuales se tiene al Instituto Nacional de Vías (INVIAS) con la última actualización de su norma, la cual fue realizada en el año 2013; también se cuenta con las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU-11) con sus normas aplicables para bases estabilizadas y requisitos de los materiales granulares para bases.

7.2.2. Fuentes secundarias

Se utilizaron documentos o archivos, como libros, manuales, y otros trabajos de grado que se relacionan con el tema de estabilización de bases granulares y el diseño de pavimentos, ya que no existen documento que nos permitan obtener información del material tratado por Geoambiental S.A.S.

47. Castillero Mimenza, O. Los 15 tipos de investigación (y características).

8. DISEÑO METODOLÓGICO

La muestra con la que se desarrolló la investigación, proviene del material recuperado de los campos de infiltración, el cual es procesado por la empresa Geoambiental S.A.S. Este material posee partículas no deseadas, como lo son arenas, sales, agua, entre otros, por lo tanto, su proceso de refinación no es viable debido a que resulta muy costoso para su implementación en los diferentes campos industriales.

El diseño y construcción de la estructura de un pavimento flexible requiere conocer ciertas características de los materiales que conforman cada una de las capas de dicha estructura, por lo cual, la investigación se lleva a cabo mediante el estudio de las propiedades físicas de los materiales granulares y asfálticos en las diferentes capas que constituyen un pavimento tipo flexible de acuerdo con las normas Colombianas, como la del INVIAS, IDU, entre otras; esto, con el fin de analizar el posible uso que se le puede dar al material de estudio en un pavimento flexible, ya que como es un material completamente nuevo, no se encuentra caracterizado en ninguna norma y debido a las limitaciones expuestas anteriormente para el desarrollo de esta investigación, no es posible llevar a cabo los laboratorios necesarios para la correcta caracterización del material tratado por Geoambiental, por lo cual, esta investigación se basa en los datos obtenidos en los laboratorios que se lograron llevar a cabo, entre los cuales tenemos:

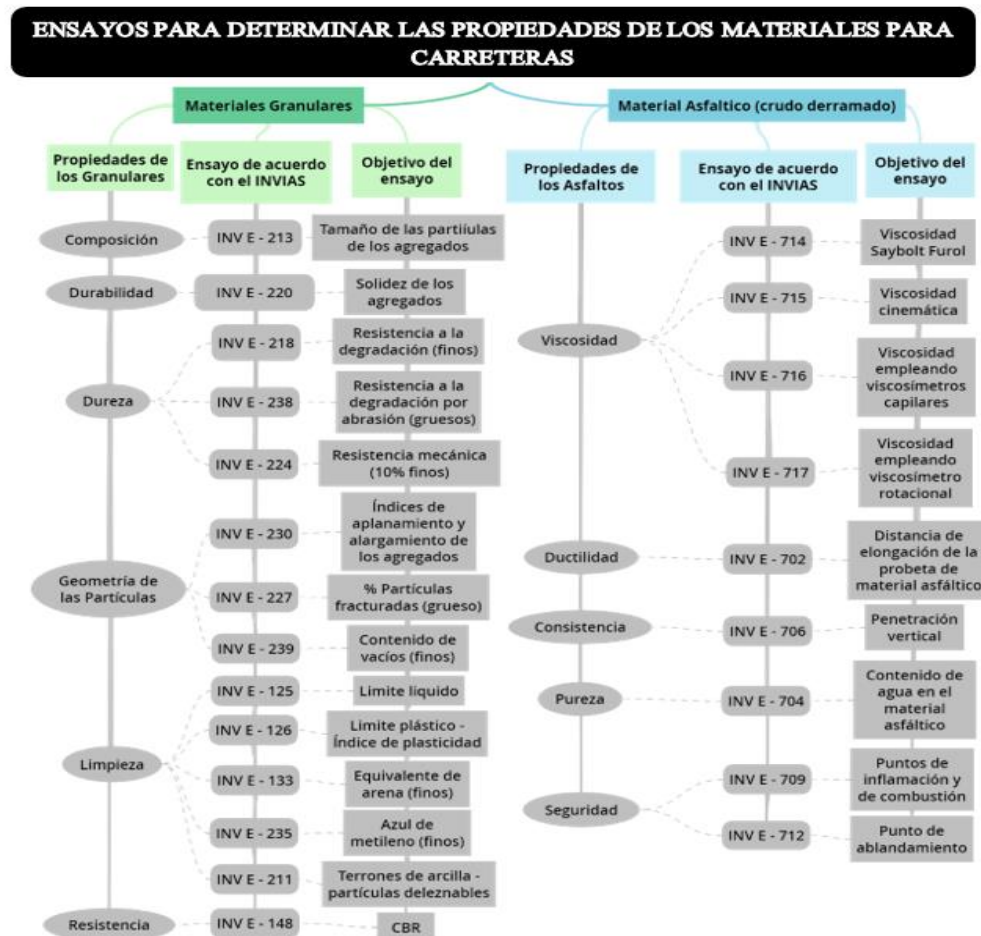
- Ensayo de extracción
- Ensayo de punto de inflamación y punto de combustión
- Ensayo de densidad específica

La investigación se centra principalmente en la implementación de este material en la capa de base, específicamente en una base tipo c (BGC), para lo cual se emplearán las normas colombianas para determinar

las propiedades teóricas que deben tener los materiales granulares que conforman la base, para que esta sea considerada de tipo c.

En el siguiente diagrama (ilustración 8) se muestran los ensayos establecidos por las normas colombianas para la caracterización de los diferentes materiales que conforman la estructura de un pavimento tipo flexible, los cuales, son de interés para el desarrollo de esta investigación. Además, en la ilustración 9 se presenta la norma correspondiente a las especificaciones del IDU para capas granulares.

Ilustración 8. Diagrama propiedades de los materiales para carreteras y su respectivo ensayo



Fuente: Autores

Ilustración 9. Especificaciones del IDU para capas granulares de base y subbase.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO		 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. <small>Instituto</small> Desarrollo Urbano
ESPECIFICACIONES IDU-ET-2011		
VERSIÓN 2.0	Fecha de Actualización: Noviembre de 2011	

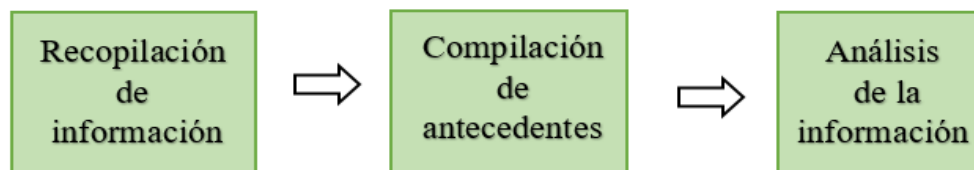
Capítulo 4. Subbases y bases

- 400-11 Capas granulares de base y subbase
- 420-11 Capas de material granular estabilizado con cemento
- 422-11 Capas de Material Granular Estabilizado en caliente con cemento asfáltico
- 440-11 Capas de material granular estabilizado con emulsión asfáltica
- 450-11 Reciclaje de Pavimento Asfáltico en el Sitio con Emulsión Asfáltica
- 451-11 Reciclaje de Pavimento Asfáltico en el Sitio con Asfalto espumado
- 452-11 Empleo de agregados pétreos a partir de concreto hidráulico reciclado
- 454-11 Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con cemento portland

Autor: Instituto de Desarrollo Urbano, 2011 ²⁶

El desarrollo del proyecto, como se puede observar en el siguiente diagrama (Ilustración 10), consta de tres (3) etapas:

Ilustración 10. Etapas de la metodología



Fuente: Autores

8.1. Etapa 1: Recopilación de la información

En esta etapa del proyecto, se realiza una adecuada investigación de las diferentes capas que conforman la estructura de un pavimento flexible, y de esta forma, obtener las características de los materiales que conforman cada una de estas capas; además, se determinan los

26. -IDU, I. de D. U. Especificaciones Técnicas Generales De Materiales Y Construcción, Para Proyectos De Infraestructura Vial Y De Espacio Público Para Bogotá D.C. 2010-2011 (2011)

parámetros establecidos en las normas colombianas con relación a las características que deben cumplir los materiales granulares en un base tipo c (BGC).

8.2. Etapa 2: Recopilación de antecedentes

Una vez establecidos las propiedades de los materiales que conforman una BGC, se analizan los métodos de estabilización de bases y los materiales que se han implementado para dicho proceso.

8.3. Etapa 3: Análisis de la información

Con los antecedentes de los materiales empleados para la estabilización de bases, se realiza un análisis donde se plantean los posibles aportes del material tratado por Geoambiental en la estabilización de bases, además, se proponen algunos usos posibles que se le pueda dar a este mismo material.

9. DESCRIPCIÓN VISUAL DEL MATERIAL TRATADO POR GEOAMBIENTAL S.A.S

El material de estudio es extraído de los campos de infiltración a cargo de la empresa Geoambiental S.A.S, en estos campos el material absorbe partículas del terreno, como arena, lo que hace que el material se endurezca al punto de parecer una roca, la cual, al golpearla se desvanece en partículas más pequeñas; por otro lado, una parte de este material no absorbe estas partículas del suelo natural donde se deposita, generando que esta fracción del material sea más de tipo plástico; esto se debe a que no todo el material depositado en los campos de infiltración tiene contacto directo con el terreno mismo, lo que provoca que el material no sea completamente homogéneo.

Ilustración 11. Material tratado por la empresa Geoambiental S.A.S



Fuente: Autores

Ilustración 12. Estado material tratado por Geoambiental S.A.S y extraído de los campos de infiltración



Fuente: Autores

De acuerdo con la figura anterior (ilustración 12), se observa que a simple vista el material de estudio es heterogéneo, a la izquierda se tiene una fracción de material de estudio que presenta características plásticas y a la derecha la fracción con contenido de agregados, la cual se asemeja a una roca.

Es necesario homogeneizar el material para así poder obtener y trabajar con una muestra única, ya que, al extraer el material de los campos de infiltración, este siempre va a salir con las características expuestas anteriormente.

10. ENSAYOS DE LABORATORIO INV E-13 DESARROLLADOS

Para la ejecución de los ensayos elaborados, se tomó el material el cual presentaba similitud a una roca; y debido al tamaño que presentaban las partículas de este material, se procedió a triturar el material con ayuda de una maceta. A continuación, se muestra el estado inicial y final del material tratado por Geoambiental antes y después del proceso de trituración.

Ilustración 13. Trituración de la fracción del material con similitud a una roca



Fuente: Autores

Ilustración 14. Estado final del material triturado



Fuente: Autores

10.1. Ensayo de Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos INV E – 732 - 13.

10.1.1. Preparación de la muestra

Para extraer el contenido de asfalto del material tratado por Geoambiental se empleó como reactivo gasolina y se tomó una fracción de 1200 gramos del material triturado.

10.1.2. Metodología del ensayo

Se toman los 1200 gramos de material triturado y se colocan en la máquina de extracción (centrífuga), se coloca un papel filtro sobre la muestra y se tapa la máquina, se agrega la gasolina que funciona como reactivo para extraer el asfalto y se enciende la máquina centrífuga.

10.1.3. Procedimiento detallado

1. Se llena el contenedor de la máquina centrífuga a ras con los 1200 gramos del material tratado por Geoambiental, el cual fue triturado anteriormente.

Ilustración 15. Vertimiento del material en el recipiente de la maquina centrifuga



Fuente: Autores.

2. Se toma un papel filtro y se registra su respectivo peso.
3. Se coloca el recipiente en la máquina y sobre este se coloca el papel filtro y se procede a tapar la máquina de extracción.

Ilustración 16. Proceso de ensamble de los materiales necesarios para el ensayo de extracción por medio de la máquina centrífuga.



Fuente: Autores

4. La tapa de la centrífuga posee un orificio por el cual se vierte el reactivo; en el desarrollo del laboratorio se agregó de a 500 ml de gasolina y se procedió a encender la máquina centrífuga, para la cual, su velocidad se aumentó de manera gradual hasta un máximo de 3600 rpm.

Ilustración 17. Adición del reactivo (gasolina) en la maquina centrífuga



Fuente: Autores

5. Se detiene la máquina centrífuga cuando se observe que el solvente deja de fluir por el desagüe de esta y se adiciona otro porcentaje de gasolina.

Este paso se realiza hasta que se observe que el líquido que fluye por el desagüe sea relativamente transparente.

Ilustración 18. Líquido que sale de la máquina centrífuga (color negro)



Fuente: Autores

En la ilustración 18, se puede observar que el líquido que fluye por el desagüe de la máquina centrífuga es de un color negro, lo que indica la presencia de contenido de asfalto en la muestra ensayada.

Ilustración 19. Líquido que fluye a través de la máquina (transparente)



Fuente: Autores

En estas fotografías (ilustración 29) se observa que el líquido que fluye de la máquina centrífuga es más claro y transparente en comparación con la ilustración 18, esto indica que se removió el porcentaje de asfalto presente en la muestra ensayada del material tratado por Geoambiental.

6. Se retira la tapa, el papel filtró y el recipiente de la máquina de extracción.

Ilustración 20. Proceso de remoción del papel filtro y material ensayado



Fuente: Autores

Ilustración 21. Estado final del papel filtro empleado en el ensayo



Fuente: Autores

Ilustración 22. Estado final de la muestra del material tratado por Geoambiental empleada en el ensayo



Fuente: Autores

7. Se deja secar el filtro al aire libre.

Ilustración 23. Papel filtro utilizado en el ensayo



Fuente: Autores

8. Se retira el material que queda contenido en el recipiente de la máquina centrífuga.

Ilustración 24. Remoción del material contenido en el recipiente de la máquina de centrifugación



Fuente: Autores

9. Se lava la muestra extraída en el numeral 8 y se lleva a secar al horno.

Nota: El material fino se deja sedimentar por un día antes de meter al horno.

Ilustración 25. Lavado y secado del material ensayado.



Fuente: Autores

10. Se pesa el papel filtro y la muestra de material seca.

Ilustración 26. Peso del papel filtro empleado en el ensayo



Fuente: Autores

11. Se determina el porcentaje de asfalto con los datos obtenidos.

10.1.4. Resultados obtenidos

Los datos registrados en el desarrollo del ensayo de laboratorio fueron los siguientes:

Tabla 11. Resultados obtenidos del ensayo de Extracción INV E - 732 - 13

DATO	RESULTADO
Peso filtro (inicial)	15,3gr
Peso muestra ensayada	1200 gr
Volumen de reactivo (gasolina) empleado	5 galones
Peso platón	326,5 gr
Peso filtro (final)	17,5 gr
Peso muestra seca + platón	1391,5 gr

10.1.5. Cálculos

Para determinar el porcentaje de asfaltado contenido en la muestra representativa empleada en el ensayo, se realizó el siguiente procedimiento:²⁵

$$[EC.1] \text{ Contenido de asfalto (\%)} = 100 - \left(\left(\frac{(W_{p+m} - W_p) + (W_{ff} - W_{fi})}{W_m} \right) * 100 \right)$$

Donde:

W_{p+m} = Peso platón + muestra seca

W_p = Peso platón

W_{fi} = Peso papel filtro inicial

W_{ff} = Peso papel filtro final

W_m = Peso muestra ensayada

Aplicando la ecuación 1 [EC. 1] y los resultados obtenidos se tiene:

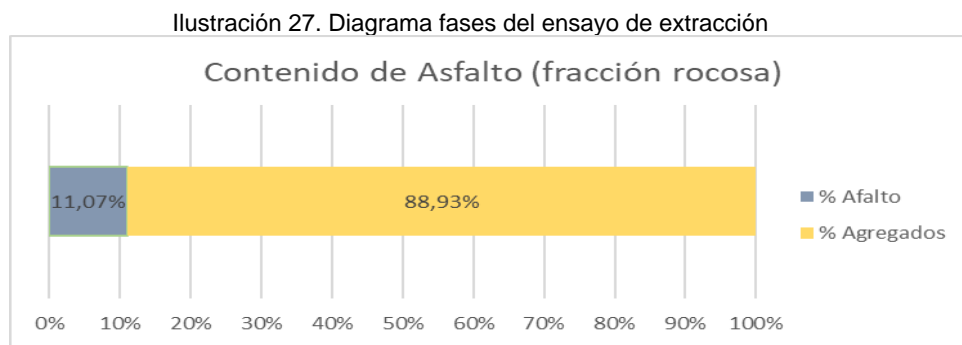
$$\% C. asfalto = 100 - \left(\left(\frac{(1391,5gr - 326,5gr) + (17,5gr - 15,3gr)}{1200gr} \right) * 100 \right)$$
$$\rightarrow \text{Contenido de asfalto} = 11,07\%$$

10.1.6. Análisis

El porcentaje de asfalto que contiene la fracción rocosa del material tratado por Geoambiental es de 11,07%; con este valor podemos determinar que este material posee una fracción considerable de crudo derramado, ya que el porcentaje de asfalto en muestras de diseño preparadas con las normas invias es de (6 a 7%).

El porcentaje de contenido de asfalto puede variar de acuerdo al solvente que se emplee en el desarrollo del laboratorio, esto se puede evidenciar en el ensayo realizado por los Ing. Octavio Loayza León MSc, Quím. Jorge Salazar Delgado y la Ing. Ellen Rodríguez Castro de la universidad de Costa Rica, donde, al utilizar gasolina como solvente, se obtiene un porcentaje de asfalto del 5%; por otro lado, al emplear tricloroetileno como solvente, el valor del porcentaje de contenido de asfalto aumenta a un 5,8%; con respecto a estos resultados, se deduce que el tricloroetileno tiene mayor funcionalidad como solvente para el ensayo de extracción. Para futuras investigaciones del material tratado por Geoambiental, se recomienda que en lo posible se emplee tricloroetileno como solvente en el ensayo de extracción INV E -732 -13.⁴⁸

En la siguiente ilustración (Ilustración 27) se presenta el diagrama con relación al contenido de asfalto y el material restante (agregados, materia orgánica, entre otros) presente en el material tratado por Geoambiental.



Fuente: Autores

10.2. Ensayo de punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta Cleveland INV E – 709 – 13.

Punto de Inflamación: Se entiende por punto de inflamación como a la menor temperatura a la cual, al aplicar una fuente de calor a la muestra, esta hace que los vapores que desprende el material generen una llama o destello.²⁵

Punto de Combustión: Hace referencia a la temperatura en la cual, al aplicar una fuente de calor a la muestra, los vapores que esta desprende, provocan una llama sostenida en un tiempo mínimo de cinco segundos.²⁵

10.2.1. Preparación de la muestra

Se tomó una muestra representativa del material sin triturar, la cual se procedió a calentar con el objetivo de derretirla y de esta forma colocarla en la copa abierta Cleveland; transcurrido varios minutos, se observó que la muestra no se derretía como consecuencia al gran contenido de partículas granulares en esta y, por el contrario, el material estaba perdiendo los gases necesarios para el desarrollo del ensayo.

Ilustración 28. Calentamiento del material tratado por Geoambiental, el cual no se derritió



Fuente: Autores

10.2.2. Metodología del ensayo

Como consecuencia de lo anterior, se tomó una muestra del material triturado que pasaba el tamiz No. 16 y se llenó con esta la copa Cleveland y se procedió a aplicar calor; transcurridos varios minutos se comenzó a realizar el barrido de la llama alrededor de la copa Cleveland donde se encontraba la muestra, con el fin de determinar los puntos de ignición y llama.

Ilustración 29. Material seleccionado para llenar la copa Cleveland



Fuente: Autores

10.2.3. Procedimiento detallado

- 1) Se llenó la copa Cleveland con el material de estudio.

Ilustración 30. Llenado de la copa Cleveland con el material de estudio



Fuente: Autores

- 2) Se ubicó el termómetro para medir la temperatura del material.

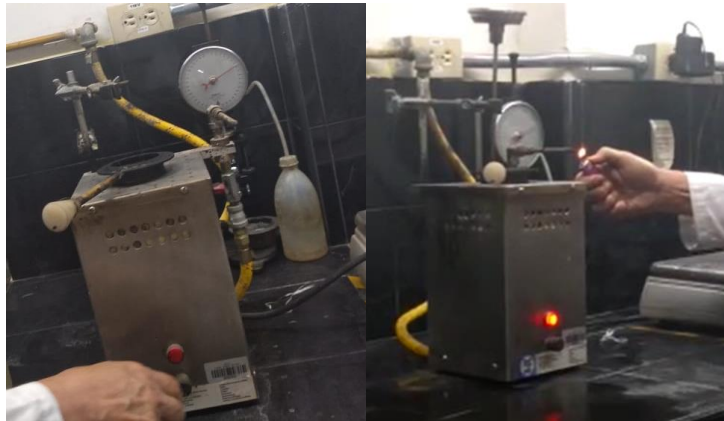
Ilustración 31. Posicionamiento del termómetro



Fuente: Autores

- 3) Se encendió la llama y se aplicó calor a la muestra.

Ilustración 32. Aplicación de calor a la muestra y encendido de la llama



Fuente: Autores

- 4) Debido a que no se tienen antecedentes del material, se desconoce el punto de inflamación y de combustión del mismo; para este tipo de casos el INVIAS establece que la muestra en la copa de ensayo se debe llevar a una temperatura inicial menor a 50°C antes de empezar con el barrido y este se debe realizar una vez por cada aumento de 2°C. El proceso de barrido consiste en pasar una llama a lo largo de la copa en un movimiento suave y continuo.

Ilustración 33. Proceso de barrido de la llama.



Fuente: Autores

- 5) Cuando la llama de barrido produce un destello sobre la superficie de la muestra, se toma la temperatura de la muestra en la que ocurrió este destello y se registra como la temperatura correspondiente al punto de inflamación.

Ilustración 34. Destello en la superficie de la muestra



Fuente: Autores

- 6) Se mantiene el proceso de calentamiento del material y barrido hasta que se el material se encienda y esta llama permanezca encendida por al menos cinco segundos; la temperatura del material en la cual ocurre este fenómeno se denomina como punto de combustión.

Ilustración 35. Presencia de llama en la superficie del material



Fuente: Autores

- 7) Determinado los puntos de inflamación y combustión, se detiene el barrido de la llama, se apaga la muestra y se suspende el calentamiento; una vez se los instrumentos se enfríen hasta una temperatura adecuada para su manejo seguro (inferior a 60°C) se procede con su limpieza.

Nota: En el desarrollo del ensayo se observó que al obtener tanto el punto de inflamación como el punto de combustión, el destello y la llama se presentó de manera dispersa, es decir, solo se generó en las partículas que tenían porcentaje de asfalto, debido a la presencia de partículas granulares en la muestra, lo que generó que la llama no fuera constante en toda la muestra.

10.2.4. Resultados obtenidos

Los resultados que se obtuvieron en el desarrollo del ensayo son:

Tabla 12. Resultados obtenidos en el ensayo de punto de inflamación y combustión INV E - 709 - 13

DATO	RESULTADO
Punto Inflamación	205° C
Punto Combustión	220° C

El punto de inflamación o ignición de la muestra, como se observa en la anterior tabla, se presentó a una temperatura de 205° grados Celsius; por otro lado, el punto de combustión se ostentó a una temperatura de 220° grados Celsius.

10.2.5. Cálculos

De acuerdo con la norma INV E – 709 – 13 “si la presión barométrica real del ambiente en el momento del ensayo difiere de 101,3 kPa (760 mm Hg), se deben corregir los puntos de inflamación y/o combustión”, para lo cual se presentan diferentes fórmulas, pero para el caso de este ensayo se empleará la ecuación [709.3].²⁵

$$[EC.2] \text{ Punto de inflamación – combustión corregido} = C + 0,033 * (760 - P)$$

Donde:

C: Punto de inflamación – combustión observado, °C

P: Presión barométrica del ambiente, mm hg

La presión barométrica de la ciudad de Bogotá = 560 mm Hg

Aplicando la ecuación 2 [EC. 2] y los resultados obtenidos se tiene:

- $\text{Punto de INFLAMACIÓN corregido} = 205 + 0,033 * (760 - 560)$
 $\rightarrow \text{Punto de inflamación corregido} = 211,6^{\circ}\text{C} \approx 212^{\circ}\text{C}$
- $\text{Punto de COMBUSTIÓN corregido} = 220 + 0,033 * (760 - 560)$
 $\rightarrow \text{Punto de combustión corregido} = 226,6^{\circ}\text{C} \approx 227^{\circ}\text{C}$

10.2.6. Análisis

La determinación de los puntos de inflamación y combustión son muy importantes en la caracterización del material tratado por Geoambiental, ya que estos nos permiten saber la temperatura máxima con la se puede manejar y almacenar este material; estos puntos indican la presencia de sustancias volátiles e inflamables y se utilizan en regulaciones de seguridad. De acuerdo con los valores obtenidos para estos puntos (inflamación: 212°C y combustión: 227°C), se determina que el ensayo INV E – 709 es adecuado para determinar las propiedades de seguridad del material de estudio, ya que esta norma puede ser aplicada “a todos los productos de petróleo con puntos de inflamación por encima de 79°C (175°F) y por debajo de 400°C (752°F)”²⁵. Además, comparando los valores obtenidos para los puntos de inflamación y combustión del material tratado por Geoambiental y el asfalto convencional (punto de inflamación: 270 – 300 °C y punto de combustión: aproximadamente 400°C)⁴⁹, se observa que estos datos son menores, que era lo esperado, debido a que el material de estudio presenta gran contenido de asfalto y que a su vez puede poseer mucho material volátil. El valor de estos datos se puede atribuir a la presencia de materiales como agua, agregados, materia orgánica, entre otros, en el material tratado por Geoambiental.

Se recomienda realizar este ensayo al material tratado por Geoambiental cada vez que se vaya a experimentar con el mismo, debido a que, como se mencionaba anteriormente, el material no es completamente homogéneo y se observa que algunas fracciones presentan mayor cantidad de asfalto, lo que podría alterar los puntos de inflamación y combustión de acuerdo al tipo de fracción de muestra que se vaya a tomar. Además, al homogeneizar el material estos puntos también podrían variar por las mismas razones mencionadas anteriormente.

25. INVIAS. Sección 700-800. (2013).

49. MGX@. Hoja informativa de protección y seguridad ambiental: Asfalto todos los grados. 1–9

10.3. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino INV E – 222 – 13.

La densidad de un material se entiende como su masa por unidad de volumen²¹

10.3.1. Preparación de la muestra

Para el desarrollo del ensayo se tomó la fracción con similitud a una roca del material tratado por Geoambiental, el cual fue triturado; se toma una muestra representativa que pasara por el tamiz No.3/4 y se dejó en condiciones saturadas durante 24 horas.

10.3.2. Metodología del ensayo

Una vez transcurrido el tiempo de saturación del material, se llevó a un estado de saturado superficialmente seco (SSS) con ayuda de un secador; posterior al secado se introduce al picnómetro y este se deja en un baño maría para que el material se acondicione a las temperaturas del ensayo; con los datos registrados de pesos en cada proceso se determina la densidad del material.

10.3.3. Procedimiento detallado

- 1) El material se dejó en condiciones de saturación por un tiempo alrededor de 24 horas.

Ilustración 36. Saturación del material tratado por Geoambiental S.A.S.



Fuente: Autores

- 2) Se saca el material evitando la pérdida de finos y se deposita y extiende en una bandeja, posteriormente se lleva a condiciones de saturado seco

21. INVIAS. Sección 200. (2013).

superficialmente (SSS), esto se realizó con ayuda de un secador, con el cual se genera una corriente de aire tibio sobre la muestra, la cual se debe revolver periódicamente para que quede homogénea.

Ilustración 37. Retiro, extensión y secado del material para llevarlo a condiciones de saturado y superficialmente seco (SSS)



Fuente: Autores

- 3) Para determinar si las partículas de la muestra se encontraban en estado SSS, se implementa un molde cónico, este se ubica con su diámetro mayor sobre la superficie y se le agrega el material suficiente hasta rebosar el cono, posterior a esto, se apisona el material dentro del molde, aplicando 15 golpes con el pisón, para los golpes el pisón debe caer libremente desde una altura aproximada a 5 mm.

Ilustración 38. Llenado del molde cónico con el material SSS



Fuente: Autores

Ilustración 39. Apisonamiento del material en el molde cónico



Fuente: Autores

- 4) Una vez realizados los 25 golpes, se dejó el material a ras con la parte superior del molde, se removió el material suelto alrededor del este y se levantó el molde verticalmente.

Ilustración 40. Retiro del molde cónico



Fuente: Autores

El ítem 3 y 4 proceso se realizó hasta observar un derrumbe parcial en la muestra, lo que indica que se encuentra en condición saturada y superficialmente seca.

- 5) Con el material en condiciones SSS, se llenó parcialmente (aproximadamente $\frac{3}{4}$) el picnómetro con agua y se registró su peso.

Ilustración 41. Picnómetro



Fuente: Autores

- 6) Se introdujo 500 gramos del material en condiciones SSS en el picnómetro con ayuda de un embudo y se registró su peso.

Ilustración 42. Picnómetro con agua + material



Fuente: Autores

- 7) Se empleó un agitador mecánico, para eliminar las burbujas de aire de la muestra en el picnómetro.

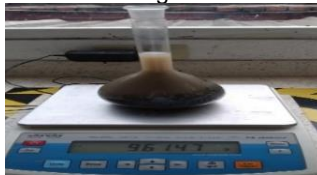
Ilustración 43. Máquina de agitación para eliminar las burbujas de agua presentes en la muestra del picnómetro



Fuente: Autores

- 8) Una vez eliminadas las burbujas de aire, se introdujo parcialmente el picnómetro con la muestra en un baño maría, con el fin de que la muestra se ajustara a una temperatura de $23 \pm 2^\circ \text{C}$ y posteriormente se llenó el picnómetro de agua hasta la marca de capacidad del mismo.
- 9) Cuando se determinó la temperatura adecuada del picnómetro, se retiró del baño maría, se secó la superficie del picnómetro y se registró su peso.

Ilustración 44. Peso picnómetro con agua + material después del baño maría



Fuente: Autores

- 10) Se removió el material del picnómetro y se secó al horno.
- 11) Se registró el peso del material seco y se procedió a realizar los cálculos correspondientes.

Ilustración 45. Material ensayado seco al horno



Fuente: Autores

Nota: El procedimiento realizado en este ensayo corresponde al procedimiento gravimétrico expuesto en la INV E – 222 – 13.

10.3.4. Resultados obtenidos

Tabla 13. Resultados obtenidos en el ensayo de densidad de la muestra INV E - 222 - 13

DATO	RESULTADO
Peso picnómetro	185,8 gr
Peso picnómetro + agua	683,3 gr
Temperatura baño maría	22,9°C
Peso picnómetro + agua + material	952,2 gr
Peso muestra seca al horno	457,4 gr

10.3.5. Cálculos

De acuerdo con la especificación del ensayo INV E – 222 -13 del INVIAS, con los datos obtenidos en este laboratorio se pueden determinar la densidad relativa o gravedad específica en diferentes condiciones: ²¹

- Densidad Relativa:

[EC.3] Densidad relativa seca al horno (SH) =

$$\frac{A}{B + S - C}$$

[EC.4] Densidad relativa en condición saturada y superficialmente seca (SSS) =

$$\frac{S}{B + S - C}$$

[EC.5] Densidad relativa aparente =

$$\frac{A}{B + A - C}$$

21. INVIAS. Sección 200. (2013).

- Absorción

$$[\text{EC.6}] \text{ Absorción, \%} = \frac{S-A}{A} \times 100$$

Las fórmulas mostradas anteriormente, corresponde al método gravimétrico descrito en la norma INV E – 222 -13.

Donde:

A: Masa al aire de la muestra seca al horno

B: Masa del picnómetro aforado lleno de agua

C: Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua

S: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca empleada en el desarrollo del laboratorio

Aplicando las ecuaciones de la 3 a la 8 [EC. 3-8] y los resultados obtenidos se tiene:

✓ Densidad Relativa:

- Densidad relativa seca al horno (SH) =

$$\frac{457,4gr}{683,3gr + 500gr - 952,2gr} = 1,98$$

- Densidad relativa en condición saturada y superficialmente seca (SSS) =

$$\frac{500gr}{683,3gr + 500gr - 952,2gr} = 2,16$$

- Densidad relativa aparente =

$$\frac{457,4gr}{683,3gr + 457,4gr - 952,2gr} = 2,43$$

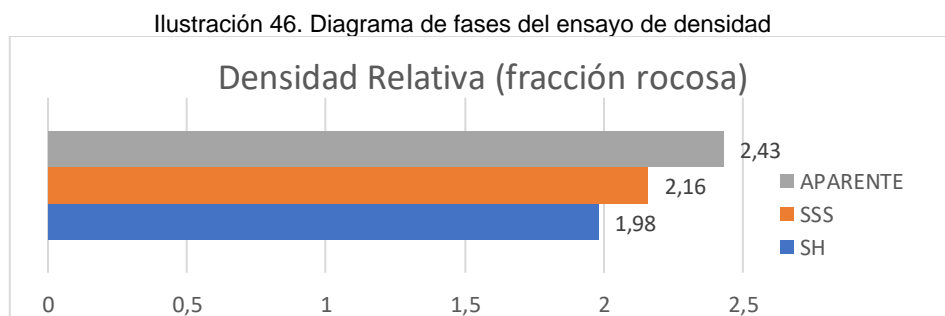
$$✓ \text{ Absorción, \%} = \frac{500gr - 457,4 gr}{457,4 gr} \times 100 = 9,3\%$$

10.3.6. Análisis

De acuerdo con el resultado obtenido de la densidad relativa aparente (2,43) del agregado fino sin la presencia de crudo derramado, que compone la fracción rocosa del material tratado por Geoambiental, se puede decir que este valor es adecuado, ya que es similar a los valores comunes de densidad aparente que se presentan en este tipo de agregados; “por lo general, el valor de esta densidad en los agregados pétreos oscila entre 2,3 y 2,8 según la roca de origen”⁵⁰.

Con respecto al resultado obtenido para el parámetro de la absorción, se observa que este valor es mayor en comparación con los valores comunes de absorción en los agregados naturales, los cuales, oscilan entre 0% y 4%, pero es apropiado en comparación con la absorción de los agregados finos, cuyos valores usualmente son mayores al 10%; obteniendo así, que los agregados finos que componen el material tratado por Geoambiental tiene un porcentaje de absorción de 9,3%.⁵¹

En la siguiente ilustración se presenta el diagrama de fases con relación a la densidad relativa del material tratado por Geoambiental en diferentes estados: seca al horno (SH), saturada y superficialmente seca (SSS) y densidad aparente.



Fuente: Autores

50. Mario, J. Blog Ingeniería Civil. *Determinación de la densidad nominal y la densidad aparente para agregados* (2008). Available at: <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/determinacin-de-la-densidad-nominal-y.html>.

51. Beltran, G. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO TRATADO CON LECHADAS POBRES. (2014)

11. ANÁLISIS GENERAL

En los resultados obtenidos en los laboratorios de la universidad católica de Colombia, con relación a las propiedades que se evaluaron a la fracción rocosa del material tratado por Geoambiental S.A.S, los cuales corresponden: 1. ensayo de extracción, 2. punto de inflamación y combustión y 3. densidades; se puede observar que este presenta un alto porcentaje de contenido de asfalto, el cual equivale a un 11,07 % y el porcentaje restante (88,03%) corresponde a materia orgánica, gravas y suelos blandos; se deduce que al mezclar las dos fracciones y homogeneizar el material, este porcentaje de contenido de asfalto aumente, ya que se observa mayor presencia de este material bituminoso en la fracción con propiedades de flexibilidad; el contenido de asfalto en el material tratado por Geoambiental puede favorecer los procesos de estabilización de una base, ya que se podría decir, que brinda mayor cohesión entre el material de estudio y las partículas granulares de la capa base. Por otro lado, debido al alto porcentaje de contenido de asfalto en el material tratado por Geoambiental, al implementarlo en los procesos de estabilización de bases granulares, esta podría ser susceptible a problemas de ahuellamiento, que se define como la acumulación de deformaciones verticales permanentes como consecuencia a cargas repetidas que produce el tránsito vehicular y que puede ocasionar fallas estructurales o funcionales; “grandes contenidos de asfalto producen bajos contenidos de vacíos en las mezclas y como consecuencia un incremento potencial en la susceptibilidad a la deformación plástica o a la formación de ahuellamiento”⁵².

52. Marroquín, J. Estudio de la susceptibilidad al ahuellamiento en mezclas asfálticas semidensas. (2017).

Otro problema que se podría presentar en la base estabilizada con el material de investigación debido al alto contenido de asfalto en este, es el fenómeno de la exudación, que se entiende como el deterioro en la superficie de una mezcla asfáltica, donde se observa la presencia de asfalto en la superficie combinado con finos y sin contenido de áridos; “La exudación es originada por exceso de asfalto en la mezcla o un bajo contenido de vacíos de aire”⁵³.

Generalmente estos problemas de deformaciones por ahuellamiento y exudación se presentan en zonas con temperaturas altas y están estrechamente relacionado al contenido de vacíos de la mezcla; “para contenidos de vacíos menores a 3 %, la mezcla es muy propensa a exudar y/o ahuellarse”⁵⁴.

Con el ensayo de punto de inflamación y combustión (INV E - 709), se observa que la fracción rocosa presenta unas condiciones de seguridad adecuadas, ya que se esperaba que estos puntos dieran a temperaturas más bajas debido a su precedencia (petróleo crudo); el valor de los puntos de inflamación y combustión (212 y 227 °C respectivamente), nos permiten determinar las condiciones de seguridad de trabajo en el manejo de este material con relación a la temperatura; cabe resaltar que este ensayo se realizó a la fracción rocosa, por lo que podría variar según la fracción que se tome e incluso con el material tratado por Geoambiental homogeneizado; se recomienda realizar este ensayo cada vez que se vaya a experimentar con el material de estudio. El valor de estos puntos se puede atribuir a la presencia de materiales granulares, agua y materia orgánica en la composición del material, debido a que en el desarrollo del

53. Cervantes, V. & Salas, M. Boletín Técnico - Causas y consecuencias de la exudación. (2016).

54. Asphalt Institute, Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types, Manual Series No. 2, The Asphalt Institute, Lexington, Kentucky, 1997.

laboratorio se evidenció que la chispa y la llama, no eran constantes con respecto a la muestra representativa y se generaban en las partículas donde había mayor presencia de asfalto, como consecuencia a que el material no estaba homogeneizado; además, los datos obtenidos del ensayo (INV E - 709) nos permiten tener una referencia de las zonas donde se puede trabajar con este material, para lo cual, de acuerdo con los valores obtenidos, no se presentan límites, permitiendo su implementación en la construcción de estructuras de pavimento en zonas donde las condiciones de temperatura son extremadamente altas, pues este material presenta una buena tolerancia a la temperatura; y como apoyo a esta hipótesis, se agrega que al momento de poner a calentar una muestra representativa de este material, esta no se derritió a pesar del tiempo que llevaba (alrededor de media hora), lo que se atribuye, como se mencionó anteriormente, a la presencia de material granular en la mezcla.

Comparando los datos de punto de inflamación y combustión obtenidos para la fracción rocosa del material tratado por Geoambiental con los materiales asfálticos empleados actualmente en el campo de la construcción de vías, se observa que estos son inferiores, por ejemplo:

- La emulsión asfáltica de tipo mineral tiene un punto de combustión superior a 300°C
- Para los asfaltos impermeabilizados u oxidados, estos puntos generalmente se obtienen entre 280 - 300 °C
- Los cementos asfálticos deben tener un punto de inflamación de aproximadamente 230°C con el fin de que estos puedan ser empleados como asfaltos para pavimentación

Los materiales asfálticos que se emplean actualmente para mejorar los suelos mediante los procesos de estabilización, son: el cemento asfáltico y las emulsiones asfálticas, esta última es la más utilizada ya que se puede utilizar con materiales pétreos húmedos y no

requiere de altas temperaturas para hacerlo manejable; generalmente estos productos se someten a temperaturas entre 140 - 160 °C con el fin de poder mezclarlos con los pétreos; comparando este rango de temperatura con los puntos de inflamación y combustión obtenidos para la fracción rocosa del material tratado por Geoambiental, el material de investigación puede tener una resistencia a temperatura inferior con relación a los materiales asfálticos usados para el mejoramiento de suelos, pero a su vez, tiene una alta resistencia a la temperatura, lo que favorece los procesos de transporte, almacenamiento y manejo del material.

En cuanto al ensayo de densidades (INV E - 222 - 13), este, al igual que los ensayos anteriormente mencionados, se realizó a la fracción rocosa del material tratado por Geoambiental debido al alto contenido de material granular en el mismo; este ensayo es de gran importancia por los diferentes datos que se pueden obtener de él, como es el caso de la absorción del material, que para el material de estudio fue de 9,3%; el valor de absorción es empleado para determinar los cambios de masa que se pueden presentar en los agregados “a causa del agua absorbida por los poros permeables de sus partículas”; por otro lado los valores de densidad obtenidos pueden ser empleados para determinar valores de humedad, contenido de vacíos, volumen, entre otros, mediante el desarrollo de laboratorios adicionales, como el INV E - 217, con el fin de obtener los datos restantes para poder calcular estos parámetros.

Una característica que también se pudo evidenciar, es que al preparar la fracción rocosa del material tratado por Geoambiental para el desarrollo de los ensayos de laboratorio, este presentó una alta dureza, ya que se necesitó una maceta y puntero para poder tritararlo, lo cual, nos da una

idea de la consistencia de este material proveniente de los derrames de crudo mezclado con otros materiales y procesado y depositado en campos de infiltración por la empresa de Geoambiental; por otro lado, en la otra fracción del material con características plásticas, se observa mayor presencia de asfalto, lo que le brinda a esta fracción mayor viscosidad y flexibilidad. Con relación a la fracción rocosa, esta podría ser empleado como agregado fino para el proceso de estabilización de la base, debido a las propiedades que presenta, las cuales se mencionaron anteriormente; este tipo de estabilización sería de tipo química, ya que la idea sería pulverizar el material para que este pueda ser agregado a la base granular.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación tiene como objetivo principal plantear el mejor uso posible que se le pueda dar al material tratado por Geoambiental en la estructura de un pavimento, a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio realizados y la información recolectada con relación a la temática de estabilización de bases; para lo cual, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

De acuerdo con lo analizado anteriormente, este material puede ser empleado para la estabilización de capas granulares que conforman la estructura de un pavimento, ya que con los propiedades del material tratado por Geoambiental estudiados en esta investigación se estima que el material puede aportar a la cohesión entre las partículas granulares que conforman la capa base de un pavimento, por otro lado, se deduce que gracias a la presencia de contenido de asfalto en el material de estudio y las propiedades de dureza y flexibilidad que se observó en cada fracción, este material homogeneizado podría brindarle a la capa un aumento de resistencia a deformaciones generadas por las cargas impuestas.

En el caso de futuras investigaciones del material tratado por Geoambiental, se recomienda primeramente homogeneizar el material, ya que este siempre va venir de los campos de infiltración en el estado que se describió en esta investigación; además, se recomienda empezar la caracterización del mismo con el ensayo de punto de inflamación y combustión (INV E - 709), ya que este ensayo nos brinda las condiciones de seguridad con las que se puede manipular el material; también, se deben hacer ensayos relacionados tanto con los materiales granulares como con el asfalto, ensayos como: granulometría, materia orgánica, equivalente de arena, ductilidad, penetración, entre otros, asimismo, los

que se consideren necesarios para realizar la correcta caracterización del material tratado por Geoambiental.

Para poder determinar los efectos que tiene el uso del material tratado por Geoambiental como material estabilizante en una base granular, se recomienda realizar los ensayos descritos en las normas colombianas como el INVIAS Y el IDU con relación a estabilización de bases, específicamente, para la estabilización de tipo bituminosa, ya que, dentro que los materiales que conforman el material de investigación, se tiene un alto contenido de asfalto; entre estos ensayos tenemos el ensayo de compresión y el de tracción indirecta, los cuales, nos permiten determinar la resistencia a la deformación de la capa de base granular estabilizada debido a una carga que se le impone, la cual, en la vida real, serían las cargas por el tráfico vehicular; además, se recomienda trabajar con diferentes porcentajes de contenido del material para elaborar las probetas; los porcentajes de material tratado por Geoambiental homogeneizado con los que se recomienda trabajar inicialmente son: 2%, 2,5%, 3%, 3,5% y 4%; estos valores son relativamente bajos si los comparamos con los porcentajes que se implementan de los diferentes materiales empleados para la estabilización de bases, como el cemento que usualmente se emplea como mínimo el 5% de este material para los procesos de estabilización. Estos porcentajes recomendados se deben a que el material de estudio nunca ha sido utilizado como material de construcción y menos para estabilización de bases, por lo cual, se desconoce cuál es el porcentaje óptimo del material tratado por Geoambiental que se debe agregar a la base para lograr su adecuada estabilización, por lo cual se recomienda empezar con proporciones pequeñas.

Como primer uso de este material tratado por Geoambiental, se recomienda sea implementado en la estabilización de bases para vías de

categoría terciaria, ya que el flujo vehicular que presentan este tipo de carreteras nos permite estudiar la funcionalidad de este material y si este puede ser empleado en vías de categoría mayor (secundarios y primarias). Al mejorar el estado de las vías del país se genera un desarrollo tanto en infraestructura como económico y social, ya que al tener vías en buen estado y que cumplan todas las normas establecidas, facilita el transporte de diversos productos que se realizan en cada municipio y departamento de Colombia, ya que la mayoría de habitantes y productos se movilizan por tierra, además, debido al estado actual de las vías terciarias de nuestro país, donde la mayoría se encuentran en tierra o afirmado, este uso al material tratado por Geoambiental sirve como una solución para facilitar el tránsito de los lugares donde se presenta escasez recursos, donde es habitual ver este tipo de carreteras y, mejorando a su vez la calidad de vida de los pobladores que habitan estas zonas.

Cabe resaltar que para poder establecer si el material tratado por Geoambiental funciona como material estabilizante y qué aportes tiene para mejorar el comportamiento de una base granular, se debe realizar una investigación más profunda, donde se caracterice en su totalidad el material de estudio y se realicen las probetas con los porcentajes recomendados anteriormente, elaborando los ensayos establecidos por las normas colombianas, con el fin de determinar el comportamiento y la resistencia que aporta el material tratado por Geoambiental a la base granular y a su vez el porcentaje óptimo que se debe emplear de este material para los procesos de estabilización.

BIBLIOGRAFÍA

1. Pérez V, G. J. A FORTRAN-IV Version of the sum-of-exponential least squares code EXPOSUM. *Libr. Danish At. Energy Comm.* 1279 1–57 (2005).
2. Gonzalez, A. M. & Alba, C. A. Infraestructura vial en Colombia: un análisis económico como aporte al desarrollo de las regiones 1994-2004. 1–66 (2006).
3. Serrano Guzmán, M. F., Torrado Gómez, L. M. & Pérez Ruiz, D. D. Impact of Oil Spills on the Mechanical Properties of Sandy Soils. *Rev. Científica Gen. José María Córdova* 11, 233–244 (2013).
4. Torres, R. G. Contaminación por petróleo. (1983).
5. Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B. & Mauricio-Gutiérrez, A. Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México. *Agric. Soc. y Desarro.* 11, 539 (2014).
6. ELCOLOMBIANO.COM. DERRAMES DE PETRÓLEO. (2019). Available at: <https://www.elcolombiano.com/cronologia/noticias/meta/derrames-de-petroleo>.
7. Celis Hidalgo, J. Efectos De Los Derrames De Petroleo Sobre Los Habitats Marinos. *Cienc. Ahora* 24, 22–30 (2009).
8. Fong, I. A. & Ruiz, A. T. De. EL PETRÓLEO Y SU PROCESO DE REFINACIÓN. *Univ. Tecnológica Panamá* 8,9/47
9. INVIAS. Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. 1–8 (2013).
10. Huang, Y. H. Pavement design and analysis. Second Edi, 785 (2004).
11. Rondon Quintana, H. A. & Reyes Lizcano, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).
12. Arenas Lozano, H. L. 1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES. 1–41 (1999).
13. Sanchez Sabogal, F. *PAVIMENTO*. (1984).
14. Yoder, E. J. & Witczak, M. W. *Principles of Pavement Design*. (A Wiley-Interscience publication, 1991).
15. Instituto de Desarrollo Urbano. Capas Granulares De Base Y Subbase. 102 (2005).
16. INTERBITUMEN. *PAVIMENTOS*. (2018).

17. Hveem, F. N. Pavement Deflections and Fatigue Failures. 43–87 (1948).
18. Morales Cárdenas, P. J., Chávez Arévalo, O. & López Poveda, L. Efectos de la alta compactación de la capa de base en pavimentos flexibles. *Univ. Nac. Ing. Fac. la Tecnol. la Construcción* 1–90 (2009).
19. IDU. CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUBBASE IDU 400-11 Página 1 de 22. 1–22 (2011).
20. Papagiannakis, A. T. & Masad, E. A. *Pavement Design and Materials*. (2017).
21. INVIAS. Sección 200. (2013).
22. INVIAS. Sección 100. *Especificaciones Gen. construcción carreteras y normas Ens. para Mater. carreteras* 100, 185–206 (2013).
23. Arenas, H. Tecnología del cemento asfáltico. 304 (1999).
24. Salazar Delgado, J. Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). *Métodos y Mater.* 1, 25–38 (1969).
25. INVIAS. Sección 700-800 (Primera parte). (2013).
26. -IDU, I. de D. U. Especificaciones Técnicas Generales De Materiales Y Construcción, Para Proyectos De Infraestructura Vial Y De Espacio Público Para Bogotá D.C. 2010–2011 (2011).
27. VISE. CARACTERISTICAS DE LAS BASES ESTABILIZADAS.
28. Wegman, D. E., Sabouri, M., Korzilius, J., Kuehl, R. & Intertec, B. Base Stabilization Guidance and Additive Selection for Pavement Design and Rehabilitation. 36 (2017).
29. millergroup.ca. B a s e t a b i l i z a t i o n.
30. MCA. TECHNICAL BULLETIN. 2, 2–4
31. Federal Highway Administration. STABILIZED BASE. (2016). Available at:
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/app5.cfm>.
32. Rocci, S. Bases estabilizadas con cemento. *Inf. la Construcción* 17, 79–99 (1964).
33. Flores Loza, G. *EFEECTO DE FATIGA EN UN MATERIAL DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO (PAVIMENTO FLEXIBLE)*. (2011).
34. Wu, Z., Liu, Y. & Intaj, F. Minimizing Shrinkage Cracking in Cement-

Stabilized Bases through Micro-Cracking. (2018).

35. Arce, M. Bases estabilizadas con cemento: Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes. *Programa Infraestruct. del Transp. - Lanamme Univ. Costa Rica* 2, 7 (2011).
36. Duque Escobar, G. . Ver 3.4 en granulometría Depende de WL y el IP. Ver línea A en la Carta de 78. 78–88 (2003).
37. Cemento, E. C. O. N. Sección: 420-11 proceso especificación técnica: 1–27
38. Instituto de Desarrollo Urbano & Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Estabilización con cal. 1–15 (2011).
39. INVIAS. Sección 600. *Comp. A J. Comp. Educ.* 1–5 (2013).
40. Young. T. B. (2007). Early-age strength assessment of cement-treated base materials. Master Science Thesis. Briham Young University.
41. Gaspard, K.J. (2002). In-Place Cement Stabilized -Base Reconstruction Techniques. Interim Report;” Construction and Two Year Evaluation”. Louisiana Transportation Research Center. LTRC Project No. 95-3GT.
42. Association, N. L. (2004). *MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL* . Obtenido de ESTABILIZACIÓN Y MODIFICACIÓN CON CAL: https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf
43. Construmatica. (s.f.). *Construmatica*. Obtenido de Metaportal de arquitectura, ingeniería y construcción: La Cal es una sustancia alcalina de color blanco o blanco grisáceo que al contacto con el agua, se hidrata o se apaga, desprendiendo calor.
44. INVIAS. (2013). *RESISTENCIA DE MEZCLAS DE SUELO CAL IN V E* – 801 – 13.
45. Angulo Macedo, A. S. (2018). *ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIONES ASFÁLTICAS*. Obtenido de <https://blog.vise.com.mx/estabilizaci%C3%B3n-de-suelos-con-emulsiones-asf%C3%A1lticas>
46. Guillermo Thenoux Z, G. E. (s.f.). *Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos*.
47. Castillero Mimenza, O. Los 15 tipos de investigación (y características).
48. Ing. Octavio Loayza León MSc, Ing. Ellen Rodríguez Castro, Quím. Jorge Salazar Delgado. Comparación de los métodos de contenido de asfalto

de mezcla asfáltica en caliente. *Universidad de Costa Rica*. [En línea] 2017.

49. MGX@. Hoja informativa de protección y seguridad ambiental: Asfalto todos los grados. 1–9

50. Mario, J. Blog Ingeniería Civil. *Determinación de la densidad nominal y la densidad aparente para agregados* (2008). Available at: <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/determinacin-de-la-densidad-nominal-y.html>.

51. Beltran, G. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO TRATADO CON LECHADAS POBRES. (2014)

52. Marroquín, J. Estudio de la susceptibilidad al ahuellamiento en mezclas asfálticas semidensas. (2017).

53. Cervantes, V. & Salas, M. Boletín Técnico - Causas y consecuencias de la exudación. (2016).

54. Asphalt Institute, Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types, Manual Series No. 2, The Asphalt Institute, Lexington, Kentucky, 1997.